MARZO 2010

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CONSERVACION
Cerco al tráfico de marfil

FISICA
Causa y origen de las turbulencias

GEOLOGIA
Continentes nacidos del choque de asteroides

MEDICINA
Fármacos que dan en otro blanco

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

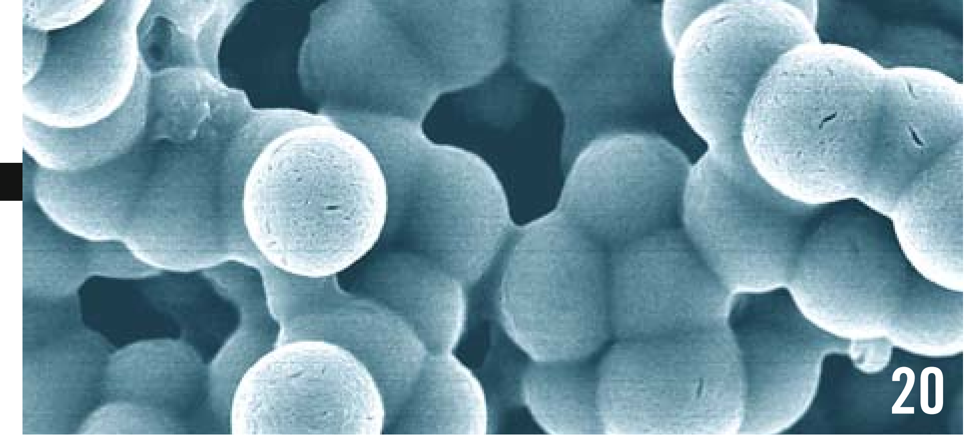
MULTIVERSO

¿Podría haber vida en otros universos?

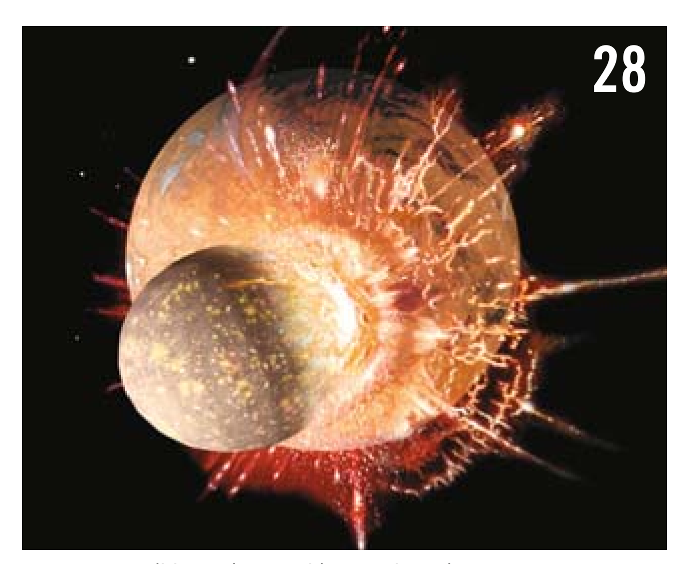
00402
9 770210 136004

SUMARIO

Marzo de 2010/ Número 402



Sabemos ahora que las nanobacterias no son nuevos y exóticos patógenos.



Las mayores colisiones de asteroides ocurrieron hace entre 3800 millones y 2500 millones de años.



A una guerra nuclear seguiría el colapso de la agricultura y una hambruna general.

ARTICULOS



Podrían haber surgido otros muchos universos, cada uno con sus leyes físicas.



El tratamiento de numerosas enfermedades tropicales es sencillo.



La turbulencia constituye uno de los problemas más complejos de la física clásica.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
COORDINADORA DE EDICIONES Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

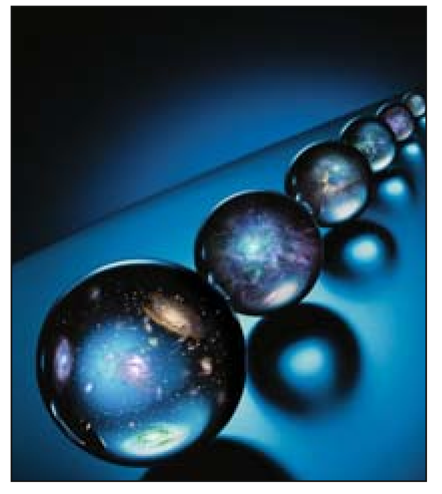
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ernesto Lozano Tellechea: *Buscando vida en el multiverso*; Juan Manuel González Mañas: *Apogeo y caída de las nanobacterias*; Sónia Ambrós i Albesa: *El origen violento de los continentes*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; J. Vilardell: *Repercusión planetaria de una guerra nuclear regional, Hace...* y *Curiosidades de la física*; Francesc Asensi: *Enfermedades tropicales olvidadas*; Luis Bou: *Delincuencia informática*, *Fármacos alostéricos* y *Apuntes*; Joandomènec Ros: *La senda del marfil*; Bruno Moreno: *Apuntes*



Portada: Kazuo Kawai, *Getty Images* (*fotografía*), Jean-Francois Podevin (*galaxias*)

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Agricultura moderna. «Los israelitas del siglo XX llegaron a un país de dunas invasoras de unas tierras costeras antaño verdeantes, de ciénagas palúdicas y de cerros calizos, pelados, de los que se estima que una capa de un metro de tierra fértil [mantillo] fue extraída, cribada y esparcida como lavado estéril sobre las llanuras o arrastrada por las inundaciones. El suelo de Israel había corrido la misma suerte que la tierra en todo Oriente Medio. Con la decadencia del Imperio Bizantino, hace 1300 años, declinaron la productividad y la población. Hoy la mayoría de los pueblos del mundo habitan en tierras donde la humanidad lleva más tiempo viviendo en sociedades organizadas. En ellas, los suelos agrícolas se encuentran en el peor estado. El ejemplo de Israel muestra que es posible recuperar la tierra y que el consiguiente aumento en el suministro de alimentos puede vencer el aumento de población mundial que, a fin de siglo, duplicará los actuales 2800 millones.»

...cien años

Curie, Debierne. «Según la teoría de las transformaciones radiactivas, la cantidad de polonio presente en los minerales radiactivos debe ser muy reducida. Según esa teoría, el polonio procede del radio, y la proporción relativa de ambas sustancias en los equilibrios radiactivos es igual al cociente entre sus vidas medias. Puesto que la vida media del radio es de unas 5300 veces la del polonio, y que el radio se encuentra en la pechblenda en la proporción aproximada de 0,2 gramos por tonelada, resulta que el mismo mineral no puede contener más de unos 0,04 miligramos de polonio por tonelada. En fecha reciente hemos acometido una investigación química con la idea de preparar polonio concentrado. La hemos llevado a cabo con las toneladas de residuos de mineral de uranio que para ello fueron puestas a nuestra disposición.

—Mdme. Curie y A. Debierne.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. II, N.º 11; 12 DE MARZO DE 1910

Monitorización clínica. «Es de la máxima importancia que el médico se mantenga informado de la variación de la temperatura sanguínea. Según la práctica actual, se toma la temperatura a intervalos regulares, tres o cuatro veces al día, por ejemplo, con un termómetro sensible. Por supuesto, esa práctica no ofrece información alguna respecto a las oscilaciones térmicas que puedan haberse dado entre dos lecturas y que, en algunos casos, sería deseable conocer. Un fabricante berlinés ha perfeccionado recientemente un aparato que permite registrar de forma automática y continua ese importante dato (*véase ilustración*).»

...ciento cincuenta años

Espejos ustorios. «Importante para los exportadores de algodón: ¡Cuidado con los ojos de buey! Se ha observado (dice el *New York Tribune*) que los incendios ocurridos con tanta frecuencia en los buques con carga de algodón se han limitado principalmente a barcos norteamericanos, en los que los convexos portillos de las bandas tienen una peculiaridad. Los buques extranjeros rara vez los emplean para iluminar; en ellos no se ha declarado ni un solo incendio en nuestros puertos algodoneros. La teoría es que el ojo de buey actúa a modo de espejo ustorio cada vez que la luz del sol lo atraviesa y prende fuego a todo artículo combustible que se halla en su foco.»

Vacúnese. «‘El gas [de iluminación de interiores] es, se supone, un potente desinfectante y, por ello, no hay contagios dentro de su círculo de influencia.’ Reproducimos la frase anterior al objeto de poner en tela de juicio la conclusión de que el gas protege de la viruela. Esta es, sin duda, poco frecuente entre las personas que en nuestras ciudades emplean luz de gas, ya que acostumbran ser lo bastante inteligentes y previsoras para preocuparse de que su familia se vacune; los estragos de la viruela se limitan casi exclusivamente a las clases faltas de previsión que no se protegen contra la viruela, ni contra otras amenazas futuras y que viven bajo luz de ligroína.»



TEMPERATURA CORPORAL: monitorización eléctrica continua, 1910.

ARQUEOLOGIA

Muro galo en Hérisson

Los galos construían un tipo particular de muralla: el *murus gallicus*. En Hérisson, población del Allier, en Auvernia, los arqueólogos de la Asociación para la Investigación de la Edad de Hierro en Auvernia acaban de encontrar la puerta principal de una fortaleza del siglo I a. C. Su estructura, intacta en sus dos primeros metros de altura, está integrada en el *murus gallicus* mejor conservado que se haya encontrado hasta la fecha.Las investigaciones que se están realizando en Hérisson se proponen descubrir cómo fue la Chateloy gala. Esta fortaleza se encuentra en un promontorio sobre el valle del Aumance. Sus potentes fortificaciones son aún visibles bajo la forma de un imponente talud de 800 metros de largo.



Las investigaciones se centran ahora en la puerta principal. El murus gallicus que la flanquea es una construcción de tierra consolidada por vigas horizontales entrecruzadas y ligadas unas a otras, y protegida por un paramento de piedras sin argamasa. La puerta era la entrada obligada de los carros, los mercaderes, los jinetes y las tropas. Tiene un vano de siete metros de ancho; el corredor de entrada está marcado por las profundas hendiduras talladas por el paso repetido de los carros. La entrada muestra indicios de maderas carbonizadas y trazas de fuego en el suelo y las piedras. Son indicios de un incendio. Las marcas de grandes postes de madera indican que hubo una construcción de entrada para el control de la circulación, ya que se hallaba sobre el pórtico por donde se entraba en aquel lugar. Es verosímil que el incendio que sufrió esta puerta monumental tenga que ver con uno de los episodios de la guerra de las Galias narrados por Julio César: Vercingétorix ordenó en la primavera de 52 a.C. que se quemasen veinte aldeas de los bitúrigos, uno de los pueblos galos, a fin de frenar el avance de las legiones hacia Avaricus (Bourges, la capital de los bitúrigos). Entre las poblaciones así sacrificadas, la protegida por la fortaleza de Chateloy habría sido la primera identificada por los arqueólogos. —*François Savatier*

MASAS

Moderar el vandalismo

Se conoce como “desorden de multitudes en espectáculos futbolísticos” en la bibliografía científica. En la calle, simplemente vandalismo futbolístico. Los tumultos en los partidos internacionales son tristemente famosos por la intensidad de su violencia. Recordemos los disturbios en el estadio Heysel de Bélgica, en 1985, que provocaron la muerte de 39 hinchas durante un partido entre un equipo inglés y otro italiano. Para mantener el orden público, numerosos países inundan con policías antidisturbios los partidos importantes; sin embargo, la exhibición amenazante de uniformes, cascos y porras ejerce a menudo el efecto contrario y opera a modo de detonante.

Los expertos han encontrado una forma mejor de mantener el orden. Clifford Stott y su grupo, de la Universidad de Liverpool, llevaron a cabo un experimento multitudinario en la final de la Eurocopa 2004. Los encargados portugueses de la seguridad aceptaron las recomendaciones de los investigadores de utilizar tácticas no agresivas y de perfil bajo. Por ejemplo: que los agentes de policía más cercanos a los hinchas no mostrasen equipamiento antidisturbios.

Los portugueses desplegaron una media de siete policías por cada cien aficionados durante los partidos de alto riesgo, una cifra muy baja en comparación con la media de un policía por cada dos aficionados durante la Eurocopa 2000, en los Países Bajos y en Bélgica. Sólo un hincha inglés de entre los 150.000 presentes en la Eurocopa 2004 fue arrestado por conducta violenta, mientras que, en la Eurocopa 2000, fue necesario arrestar a un millar de aficionados británicos.

El nuevo estilo *laissez-faire* no irritó a los hinchas de la forma en que lo hacen las legiones de policías antidisturbios. Según parece, las demostraciones de fuerza tienden a despertar la ira de las multitudes, sobre todo si la policía muestra algún favoritismo, como sucedió en un partido en Roma, en 2001, cuando los agentes permanecieron impasibles mientras los fanáticos hinchas italianos arrojaban a los seguidores del Manchester United botellas de plástico llenas de agua.

El grupo de Stott trabaja en la actualidad en un proyecto patrocinado por la Unión Europea para poner en práctica dichos métodos policiales en los Estados miembros.

—*Gary Stix*



LOS HINCHAS DEL LIVERPOOL animan a su equipo en un partido jugado en casa, en 2007.

DAVID LALLEMAND/ARAFA (*arriba*); BEN RADFORD *Corbis* (*abajo*)

DATOS

Energía para la Tierra

Las técnicas disponibles permiten obtener suficiente energía de las fuentes renovables para satisfacer varias veces las necesidades del planeta entero, según un informe del Instituto de Observación Mundial publicado en 2009. El informe resume también la cuarta evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático y las políticas necesarias para sobrevivir en un mundo más cálido.

Billones de kilowatt-hora de energía utilizados cada año en el mundo:

132,5

Años durante los que se podría alimentar una casa de los EE.UU. con esta energía:

13.000 millones

Billones de kilowatt-hora de energía que, en principio, podrían obtenerse con la técnica actual:

Solar:	**444**
Eólica:	**167**
Geotérmica:	**139**
Biomasa:	**69**

Porcentaje de energía total utilizada:

Por edificios:	**40**
Para la generación de electricidad:	**41**

Porcentaje de la energía total generada a partir de fuentes renovables, incluida la hidroeléctrica:

20

Fracción de energía desperdiciada en forma de calor durante la generación de electricidad: **$^2/_3$**

FUENTE: Estado del Mundo, 2009



CRONOBIOLOGIA

Mover las manillas es malo para el corazón

El horario de verano podría salvar vidas y también acabar con ellas. Los investigadores del Instituto Karolinska de Estocolmo han estudiado las tasas de infartos de miocardio en Suecia desde 1987, cuyo número aumentaba un 5 por ciento durante la primera semana de aplicación del horario de verano. Un incremento que atribuyen a la perturbación de los hábitos de sueño y los ritmos biológicos.

El adelantar los relojes una hora ayudaría, por otro lado, a evitar accidentes de tráfico, al ser mayor el número de personas que conducen con luz solar. A partir del análisis de 28 años de datos de accidentes automovilísticos, los economistas de RAND sugieren que el cambio que se produjo en 1986 de la ley estadounidense sobre el cambio de hora en verano y en invierno, que trasladó el comienzo del horario de verano del último al primer domingo de abril, produjo una reducción de entre el ocho y el once por ciento en los accidentes con peatones y una reducción de entre el seis y el diez por ciento en los accidentes que sufrían los ocupantes de vehículos.

—*Charles Q. Choi*



UN CORAZON POCO SALUDABLE: Perder una hora de sueño conlleva un aumento brusco de los problemas cardíacos.

TABAQUISMO

Dinero por dejarlo

Cuando el miedo al cáncer de pulmón o a las arrugas no basta, tal vez 750 dólares sean suficientes. Fumadores de cigarrillos a quienes se pagó por abandonar el hábito lo consiguieron con una frecuencia 2,9 veces mayor que los que lo intentaron sólo por razones de salud. A los participantes se les ofrecieron 100 dólares por la asistencia completa a un programa de abandono, otros 250 por no fumar en los seis primeros meses y 400 más por mantenerse “limpios” otros seis meses más. Incluso después de eso, quienes recibieron el dinero tenían 2,6 veces mayor probabilidad de haberse abstenido del tabaco.

—*Coco Ballantyne*



Erratum corrige

En el artículo “Geoquímica de los humeros blancos”, del mes de febrero, en la página 32, donde dice metanógenos de la familia de los Methanosarcinales, debería decir del orden de los Metanosarcinales.

MATT COLLINS (*dibujo*); JANIE AIREY *Getty Images* (*desfibrilador*); CORBS (*cigarrillos*)

ALBA

Primeras pruebas operacionales del acelerador propulsor

ALBA es una fuente de luz de sincrotrón de tercera generación que está entrando en la última fase de construcción en Cerdanyola del Vallès, Barcelona. La luz de sincrotrón de ALBA tendrá una calidad, o brillo, de primer orden; se usará para la investigación en un amplio abanico de disciplinas científicas.

La estructura consta de tres aceleradores: el acelerador lineal, el propulsor y el anillo de almacenamiento, amén de siete líneas experimentales de luz (en su fase inicial).

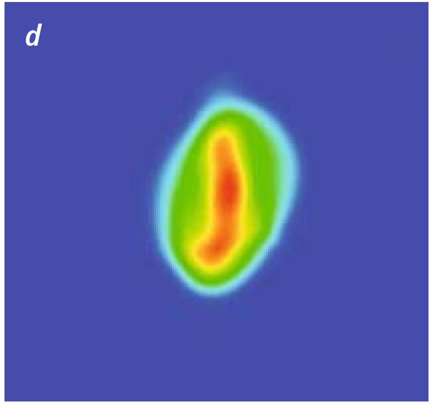
El acelerador lineal entró en funcionamiento el año pasado, en paralelo con la terminación del edificio. En él se crea el haz de electrones y se le acelera hasta 100 megaelectronvolt (MeV). Luego, el haz se inyecta en el segundo acelerador, el propulsor, donde la energía se incrementa hasta los 3 gigaelectronvolt (GeV, es decir el 99,999999 % de la velocidad de la luz). Esta es la parte más crítica de la cadena de aceleración. Por último, del propulsor, el haz se inyecta en el anillo de almacenamiento, donde los electrones son almacenados para la producción de la luz de sincrotrón.

El propulsor de ALBA, que ha sido, en su integridad, diseñado, montado y sometido a comprobación por personal adscrito a la instalación, es el primer acelerador de alta energía que se construye en España. Este propulsor tiene la emitancia más pequeña de los aceleradores de su clase, lo que repercutirá en que sea altamente eficiente. (Llámase emitancia a la extensión que ocupa el haz de electrones en el espacio de fases con coordenadas de posición y de ángulo.)

En enero del año en curso, durante dos semanas, se realizaron las primeras pruebas operacionales del propulsor, con resultados que demuestran que todos los componentes, subsistemas y equipos funcionan de acuerdo con las especificaciones. Este era el objetivo principal de las pruebas, que se han realizado en un período de tiempo corto y limitado para no entorpecer la fase postrera de la instalación del anillo de almacenamiento y de las líneas experimentales de luz. Por mor de precisión, la primera prueba se realizó el 21 de diciembre de 2009, por la noche, cuando por primera vez se in-









Edificio de ALBA (*a*). Aceleradores de ALBA, vista del túnel (*b*). Parte visible de la luz de sincrotrón captada por una cámara con dispositivo de carga acoplada (CCD) en el propulsor de ALBA (*c*). Imagen tratada del haz de electrones al interaccionar con una pantalla fluorescente (*d*).

yectó, desde el acelerador lineal, un haz de electrones en el propulsor.

El lunes 11 de enero se reiniciaron todos los sistemas y se volvió a inyectar en el propulsor. A partir de ese momento contábamos con dos semanas para demostrar que el propulsor funcionaba correctamente. El martes 12, se consiguió dar la primera vuelta completa al propulsor y en unas pocas horas el haz de electrones ya circulaba durante un centenar de microsegundos, es decir, realizaba más de cien vueltas antes de decaer. La observación del fenómeno confirmaba que los imanes y fuentes de potencia operaban de acuerdo con lo previsto.

Durante varios días se realizaron ajustes en los parámetros de los imanes y se tomaron mediciones iniciales de las características del haz de electrones para conseguir que el haz sobreviviese más tiempo dando vueltas alrededor del propulsor. Al cumplir la vuelta número 10.000, sabíamos que podíamos pasar a intentar almacenar el haz indefinidamente. Para ello, había que poner en funcionamiento el sistema de radiofrecuencia, que proporciona la energía necesaria al haz de electrones para que no decaiga. A las 15:30 del domingo 17, el haz se almacenó en el propulsor a la energía de 105 MeV.

Nos quedaba una semana para acometer la tarea más crítica. Consistía en acelerar el haz de la energía inicial, 105 MeV, hasta una energía intermedia y someter a prueba el último eslabón: la aceleración del haz con todos los sistemas sincronizados perfectamente. Dos días después, el martes 16 por la noche, se consiguió este último objetivo, acelerar el haz hasta 600 MeV. Por primera vez en España se observó la emisión de luz de sincrotrón.

Aún nos quedaba caracterizar el haz y el acelerador para poder realizar la calibración de los componentes que nos permitirán realizar simulaciones precisas.

Aunque, ante el éxito de las pruebas, se decidió intentar durante un día acelerar el haz hasta la máxima energía, 3 GeV. Se consiguió llegar hasta 2,7 GeV con una corriente de 0,7 miliampère (mA). Esto significa el 90 % y el 70 % respectivamente de los valores finales.

Los tres últimos días se dedicaron a registrar mediciones de todos los parámetros del haz y del acelerador.

Estos excelentes resultados son motivo de gran satisfacción y también una motivación añadida para cumplir los siguientes retos: la operación del anillo de almacenamiento, en otoño, y finalmente; la entrada en operación de la instalación, prevista para principios del 2011.

Francis Pérez
ALBA
Cerdanyola del Vallès (Barcelona)

La vida turbulenta del plancton oceánico

El fitoplancton marino presenta una biodiversidad sorprendente, paradójica. A ello contribuye la gran variabilidad del medio físico oceánico

El mar, siempre poderoso y a veces terrible, constituye el hogar de una inmensa variedad de formas de vida. Alberga una biodiversidad fascinante, que va desde el necton (organismos con capacidad natatoria) hasta el plancton (organismos sin capacidad natatoria, que son arrastrados por la corriente). El plancton que realiza la función clorofílica (fitoplancton), integrado sobre todo por organismos unicelulares de tamaño microscópico, presenta una biodiversidad sorprendente y, hasta cierto punto, inesperada: en una muestra de agua de mar no mayor que un vaso podemos encontrar decenas de especies de fitoplancton.

En todo sistema ecológico, cada organismo ocupa un lugar en la red trófica y está capacitado para la explotación de determinado conjunto de recursos (energía o nutrientes). En ocasiones, aparece una especie nueva que disputa los mismos recursos que la preexistente. La especie mejor adaptada al medio proliferará; la perdedora acabará desapareciendo. Esa es la lógica implacable del equilibrio trófico. Cuando dos o más especies compiten por unos recursos limitados, el ganador se lo lleva todo. La naturaleza aplica una navaja de Occam radical: poda todo lo que no es más que una burda repetición de lo que ya funciona. Ese principio de exclusión competitiva, ¿se aplica también al mar?

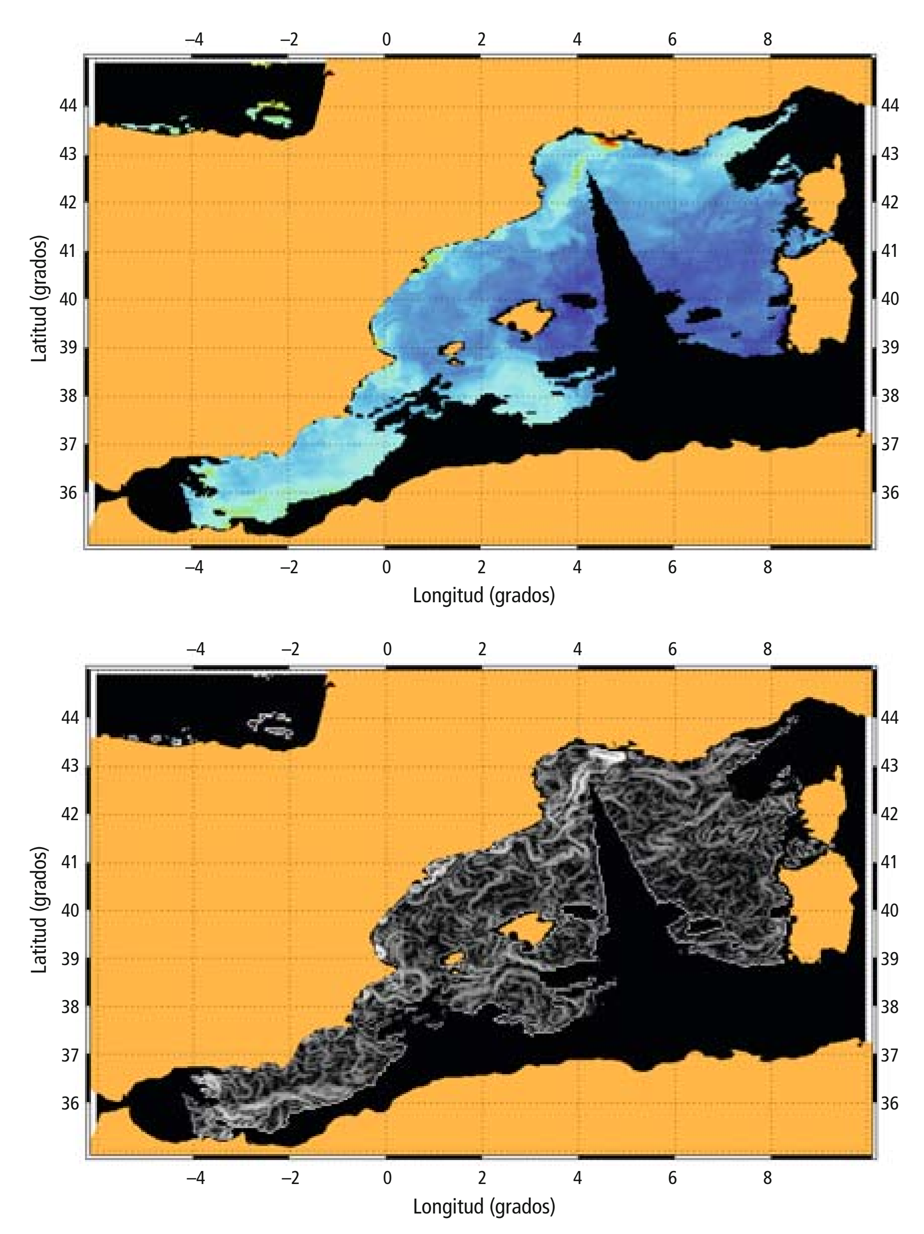
Biodiversidad paradójica

En un famoso artículo de 1961, G. E. Hutchinson destacó la enorme diversidad del fitoplancton en un entorno como el marino, en apariencia homogéneo y sin barreras naturales que pudieran crear "islas de diversidad". Según la "paradoja del plancton" de Hutchinson, la diversidad del plancton oceánico resulta, desde el punto de vista ecológico, excesiva, con numerosas especies semejantes que compiten por los mismos recursos. Algún factor equilibra las tornas e impide que haya un ganador claro. ¿De qué factor se trata?

La investigación de esa paradoja no ha sido fácil. A ello ha contribuido la dificultad de reproducir en un laboratorio el entorno marino. En el mar, tienen lugar de forma simultánea gran número de procesos físicos, químicos y biológicos que controlan el desarrollo de las comunidades planctónicas.

El fitoplancton vive en el filo de la navaja: por un lado, necesita los nutrientes, arrastrados sobre todo del fondo marino por procesos físicos complejos; por otro, debe permanecer en una delgada zona cercana a la superficie donde penetra la luz y tiene lugar la función clorofílica (zona fótica). Si las corrientes no arrastran los nutrientes hasta la zona fótica o las células de fitoplancton son arrastradas hacia las profundidades marinas, no podrán dividirse y probablemente terminarán siendo pasto de algún herbívoro. Asimismo, ciertas especies de fitoplancton resultan dañadas si la turbulencia es demasiado intensa.

La relación entre el fitoplancton y el medio fisicoquímico fue analizada por Ramón Margalef en 1978. Fruto de esos estudios es su conocido "mandala", en donde se destaca la función clave de la turbulencia o del estado del medio físico en la selección de grupos de fitoplancton, en función del tamaño, velocidad de sedimentación o movilidad, capaci-



Mapa de concentración superficial de clorofila obtenido a partir de imágenes del satélite MODIS para el 16 de agosto de 2009 (*arriba*). Mediante el análisis de singularidad de esas imágenes se obtienen los patrones de circulación (*abajo*).

dad de absorción de nutrientes y otras propiedades.

A lo largo de los años se han propuesto numerosas teorías, de menor o mayor complejidad, para esclarecer la paradoja del plancton. Hutchinson sugirió que los continuos cambios ambientales experimentados por el medio acuático podían contribuir al mantenimiento de la diversidad fitoplanctónica. Sabemos ahora que el factor fundamental que evita el principio de exclusión es la enorme variabilidad del entorno físico oceánico, en un amplísimo rango de escalas: desde la turbulencia de pequeña escala (generada por el viento, con tamaños que van de milímetros a metros) hasta patrones de mesoescala (frentes y remolinos creados por la aceleración de Coriolis, con tamaños de entre 10 y 500 kilómetros) y de dimensiones mayores.

Por otra parte, M. Scheffer y sus colaboradores mostraron en 2003 que, incluso en ambientes constantes, las interacciones entre múltiples especies podían dar lugar a oscilaciones caóticas que mantendrían la comunidad en un continuo desequilibrio y evitarían la exclusión competitiva.

Patrones de distribución

Estudios recientes han evidenciado, mediante mapas de concentración superficial de clorofila obtenidos por satélite, la variabilidad de las estructuras oceánicas y su conexión con el comportamiento del fitoplancton. Los resultados muestran que las algas con clorofila forman parches intermitentes más o menos localizados en el espacio (*patches*, en inglés). Además, técnicas finas de análisis de estructura (análisis de singularidad) revelan que la distribución de esas algas está fuertemente condicionada por los patrones de circulación de mesoscala. En un artículo de 2007 demostramos, junto con otros investigadores, que el análisis de singularidad aplicado a las imágenes de satélite de concentración de clorofila describía los patrones de circulación. Por tanto, aun cuando amplias áreas del océano parezcan presentar una concentración homogénea de clorofila, ésta sigue fielmente los patrones que le marca la circulación.

El fitoplancton se halla en la base de la pirámide trófica de los ecosistemas marinos; de forma directa o indirecta, sirve de sustento a numerosas especies marinas, incluidas las especies comerciales de peces (anchoa, sardina y atún, entre otras). Por tanto, conocer la distribución y ecología del fitoplancton es necesario para mejorar la gestión pesquera. Asimismo, la concentración de ciertas especies de fitoplancton crece en ocasiones de forma exponencial y da lugar a proliferaciones nocivas con capacidad de producir efectos dañinos para el hombre u otras especies.

La función clorofílica marina permite que el océano opere a modo de sumidero de CO_2, pero al propio tiempo hace que aumente ligeramente el calentamiento de las capas de agua superficiales. Los organismos del fitoplancton producen compuestos sulfurados que son transformados por la red trófica marina y exportados a la atmósfera, donde operan constituidos en núcleos de condensación de nubes y favorecen la precipitación. Todo ello pone de manifiesto la importancia del plancton. Entender su comportamiento y su función en la biosfera constituye uno de los grandes retos de la oceanografía marina.

Antonio Turiel, Jordi Solé y **Marta Estrada**
Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, Barcelona

La depredación de semillas

Un servicio del ecosistema para el manejo biológico de las "malas hierbas" en los cultivos herbáceos

Los sistemas agrícolas son ecosistemas —sistemas vivos, pues— en los que las especies se relacionan entre sí y con el medio, regulándose y equilibrándose. Sin embargo, la intensificación de la agricultura ha eliminado muchas de sus interacciones y funciones, y las ha sustituido por insumos externos, sean productos fitosanitarios, sean abonos sintéticos, con el objetivo de maximizar un solo componente, el cultivo. No obstante, existen aún multitud de plantas y organismos que han coevolucionado con los cultivos a lo largo de la historia y siguen cumpliendo, en algunos casos, esas funciones; tal diversidad recibe el nombre de "biodiversidad funcional".

Dentro de ese grupo se encuentran los "depredadores de semillas", organismos cuya alimentación se basa principalmente en semillas. Destacan especies tan distintas como las hormigas granívoras (de los géneros *Messor* o *Pogonomyrmex*, por ejemplo), algunos escarabajos (coleópteros Carabidae, así el género *Harpalus*), algunas especies de grillos (entre ellas *Gryllus pennsylvanicus*), pequeños roedores (como *Mus spretus*) y pájaros. Todas estas especies desempeñan una importante función en la regulación de los procesos demográficos de las malas hierbas.

En los años noventa, algunos estudios sobre la dinámica de poblaciones de las malas hierbas en campos de cultivo observaron que entre un 70 y un 99 por ciento de las semillas producidas anualmente no llegaban a emerger como plántulas al año siguiente ni formaban parte del banco de semillas del suelo. La magnitud de las pérdidas llevó a preguntarse por el destino final de todas esas semillas. Estudios posteriores han apuntado a la depredación como causa principal de la reducción.

La depredación de semillas en los campos de cereales de invierno

En los campos de cereales de invierno (trigo, cebada), las malas hierbas florecen y dispersan sus semillas durante la primavera y el verano, normalmente antes de la cosecha del cereal. Desde ese momento, las semillas están disponibles en la superficie del suelo para los depredadores. La mayoría de éstos suelen tener su pico de actividad también en esas fechas, por lo que hay simultáneamente disponibilidad de semillas y actividad de depredadores. Además, un alto porcentaje de esos depredadores son generalistas, es decir, no están especializados en el consumo de una especie determinada, sino que se alimentan de las que se encuentran disponibles en cada momento. De ese modo, el consumo de las semillas de malas hierbas presentes en la superficie del suelo ayuda a reducir el banco de semillas y disminuye problemas potenciales en las siguientes campañas.

Así, muchos organismos a los que se les había prestado poca atención hasta este momento han pasado a ser una herramienta más a tener en cuenta en el manejo integrado de las malas hierbas. Un ejemplo perfecto de un "servicio" proporcionado por el propio agro-ecosistema.

Efecto del manejo de los cultivos sobre la depredación de semillas

Los depredadores de semillas pueden vivir y alimentarse en el interior de los



1. Nido de la especie de hormigas granívoras *Messor barbarus* L. en un campo de cereal, no sometido a laboreo, en el mes de agosto.

campos de cultivo (hormigas, carábidos), en zonas próximas, como los márgenes o zonas de vegetación natural (roedores), o incluso lejos, según su movilidad (pájaros). El estudio de la depredación en sistemas agrícolas por las aves es complejo debido a su propia naturaleza, por lo que no hay muchos trabajos al respecto. En cambio, se ha estudiado más la depredación por insectos y roedores. Esos dos tipos de depredadores están muy ligados al manejo del cultivo, especialmente a las labores del suelo y al riego, ya que estas actividades pueden afectarles directamente.

Recientemente, un estudio realizado en un agro-ecosistema semiárido ha comprobado que las poblaciones de hormigas granívoras de la especie *Messor barbarus* L. en los campos de cereales de secano son mayores cuando no se realizan labores y se recurre, en cambio, a sistemas sin laboreo o de siembra directa. Además, sus tasas de depredación son muy altas. Por el contrario, cuando se labra el suelo, sobre todo si las labores son continuas y profundas (por ejemplo, con arado de vertedera), las poblaciones de hormigas pueden quedar confinadas en los márgenes, con un espacio disponible para sus nidos limitado. Como consecuencia de esta disminución de las poblaciones, las tasas de depredación de semillas también decrecen, con lo que una mayor proporción de semillas de malas hierbas se incorpora de nuevo en el suelo, constituyéndose así un reservorio para futuras infestaciones.

A su vez, el laboreo tiene un efecto directo sobre los nidos y la actividad de M. *barbarus* L. Durante la primavera y el verano, las cámaras donde almacenan las semillas, situadas en los primeros 15 o 20 centímetros de suelo, se encuentran muy cerca de la superficie, por lo que cualquier labor las destruye con facilidad. Como consecuencia, las hormigas deben dedicar tiempo y esfuerzo a la reconstrucción del nido, en lugar de destinarlos a la recolección de semillas. Asimismo, las semillas que ya habían sido recolectadas son esparcidas nuevamente por la maquinaria y, junto con las demás semillas que ya se encontraban en la superficie, se incorporan al perfil del suelo. Allí dejan de estar disponibles para los depredadores, que raramente escarban para encontrar alimento. El efecto del laboreo profundo es también muy notable en las poblaciones de roedores. Por un lado, destruye sus madrigueras; por otro, reduce la disponibilidad de alimento y las tasas de depredación.

FUENTE: P. R. WESTERMAN (*abajo*)



2. Hormigas granívoras de la especie *Messor barbarus* L. recolectando y transportando semillas de *Avena sterilis* L., mala hierba común en los campos de cereales de invierno.



3. Ejemplar de *Mus spretus* Lataste, pequeño roedor que se alimenta principalmente de semillas, en un campo de cereales.

El riego por inundación o por gravedad tiene, sobre las poblaciones de hormigas y roedores, un impacto semejante al ocasionado por el laboreo profundo. La inundación periódica impide el establecimiento de nidos y madrigueras en el interior de los campos; como consecuencia, las tasas de depredación de semillas caen drásticamente.

Cabe señalar que en los márgenes y linderos de los campos de regadío puede haber una población considerable de roedores granívoros, favorecida por la frondosidad de la vegetación herbácea allí presente. Sin embargo, las tasas de depredación por roedores se muestran lejos de poder equipararse a las causadas por las hormigas. Ello podría explicar, en parte, la mayor presión que las malas hierbas ejercen sobre el cultivo en los campos de regadío por inundación. El servicio que procuraban las hormigas granívoras debe ser, entonces, reemplazado por otro método de control, generalmente los herbicidas, más caros y contaminantes.

Si bien es cierto que el regadío y el laboreo pueden ampliar el espectro de cultivos posibles y mejorar los ingresos del agricultor, habría que determinar también los costes, monetarios y ambientales, asociados a la pérdida del servicio de los depredadores de semillas.

Bárbara Baraibar Padró
Departamento de Hortofruticultura, Botánica y Jardinería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria, Universidad de Lérida

Buscando vida en el MULTIVERSO

Otros universos con diferentes leyes físicas podrían también ser habitables

ALEJANDRO JENKINS Y GILAD PEREZ



SLIM FILMS

CONCEPTOS BASICOS

- A partir del vacío primordial que dio origen a nuestro universo podrían haber surgido otros muchos universos, cada uno con sus propias leyes físicas.
- Suponiendo que existan, muchos de ellos podrían albergar estructuras complejas e incluso vida.
- Estos resultados sugieren que quizá nuestro universo no esté tan "finamente ajustado" para permitir la aparición de vida como se había pensado hasta ahora.

Para ganarse la vida, el héroe típico de Hollywood se dedica a escapar de la muerte. Una y otra vez, infinidad de enemigos le disparan desde todas direcciones, pero fallan por milímetros. Los coches explotan siempre una fracción de segundo demasiado tarde y él consigue encontrar refugio antes de que la explosión le alcance. Sus amigos consiguen siempre rescatarlo justo antes de que le degüelle algún villano. Si cualquiera de esas acciones hubiese ocurrido de manera ligeramente distinta, habríamos tenido que despedirnos de nuestro héroe con un "*sayonara, baby*". Aun cuando no hayamos visto la película antes, hay algo que nos dice que el protagonista llegará sano y salvo hasta el final.

En cierto modo, la historia de nuestro universo se parece a una película de acción de Hollywood. Se ha aducido que un pequeño cambio en alguna de las leyes de la física hubiera desbaratado el proceso normal de evolución del universo y nuestra existencia no habría sido posible. Por ejemplo, si la interacción nuclear fuerte (la responsable de mantener unidos los núcleos atómicos) hubiera sido ligeramente más fuerte o más débil, las estrellas sólo habrían generado una pequeña parte del carbono y demás elementos que parecen necesarios para la formación de planetas, por no hablar de la aparición de vida.

Si el protón fuera un 0,2 por ciento más pesado de lo que es, todo el hidrógeno primordial se hubiera desintegrado en neutrones casi inmediatamente, con lo que nunca se habrían formado los átomos. La lista es larga.

Las leyes de la física (y, en concreto, los valores de las constantes de la naturaleza que entran en dichas leyes, por ejemplo las intensidades de las interacciones fundamentales) parecen haber sido finamente ajustadas para hacer posible nuestra existencia. Sin recurrir a una explicación sobrenatural (lo que, por definición, estaría fuera del ámbito de la ciencia), varios físicos y cosmólogos intentaron resolver en los años setenta ese misterio proponiendo que nuestro universo podría ser uno de muchos universos existentes, cada uno con sus propias leyes físicas. Según este razonamiento "antrópico", simplemente viviríamos en el universo particular en el que se dan las condiciones que hacen posible la vida.



Sorprendentemente, la teoría imperante en la cosmología moderna, concebida en los años ochenta, sugiere que tales "universos paralelos" existirían realmente; más aún: una infinidad de universos surgiría, sin cesar, de un vacío primordial tal y como nuestro universo lo hizo en la gran explosión (el *Big Bang*). Así, nuestro universo sería uno de los muchos universos de un conjunto mayor, denominado *multiverso.* En la inmensa mayoría de estos universos, las leyes de la física no posibilitarían la formación de materia tal y como la conocemos, ni tampoco la de galaxias, estrellas, planetas o vida. Pero, por el mero número de posibilidades, la naturaleza habría tenido una buena oportunidad de atinar con el conjunto "correcto" de leyes naturales, al menos una vez.

Sin embargo, nuestros recientes estudios sugieren que algunos de esos otros universos (suponiendo que existan) quizá no sean tan inhabitables. Hemos encontrado ejemplos de valores alternativos de las constantes fundamentales (y, por tanto, de nuevas leyes físicas) que todavía darían lugar a mundos interesantes y, tal vez, a la aparición de vida. La idea consiste en cambiar alguna propiedad de las leyes de la naturaleza y compensar los efectos del cambio con modificaciones adicionales en otros aspectos.

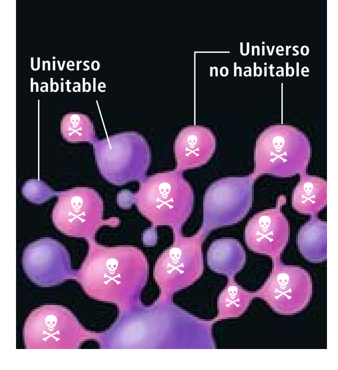
En nuestro trabajo no hemos abordado el problema de ajuste fino más importante de la física teórica: la pequeñez de la constante cosmológica, gracias a la cual nuestro universo ni volvió a colapsar una fracción de segundo después de la gran explosión ni fue hecho pedazos por una expansión exponencialmente acelerada. En cualquier caso, el haber hallado ejemplos de universos alternativos, en potencia habitables, plantea cuestiones de interés y motiva, al mismo tiempo, investigaciones futuras acerca de hasta qué punto el universo donde vivimos es único.

Una vida sin interacción débil

El modo habitual de averiguar si cierta constante física está o no finamente ajustada es convertirla en un parámetro ajustable y cambiar su valor sin modificar los del resto de las constantes físicas. Entonces, mediante cálculos, supuestos hipotéticos o simulaciones por ordenador, se "proyecta la película"

¿QUE ES EL MULTIVERSO?

Los universos alternativos se han convertido en un campo legítimo de estudio, en parte porque puede que existan realmente. Según la teoría cosmológica imperante, nuestro universo se formó a partir de una región microscópica de un vacío primordial mediante un estallido de expansión exponencial o *inflación*. Pero este mismo vacío podría estar generando continuamente otros universos, cada uno con sus propias leyes físicas. Algunos serían habitables y otros no.



del universo que cumple las nuevas leyes de la física correspondientes al cambio efectuado y se ve qué desastre ocurre primero. Pero no existe ninguna razón por la que haya que cambiar un parámetro cada vez. Viene a ser como tratar de conducir un coche variando su latitud o su longitud, pero no ambas a la vez: a menos que viajemos por una cuadrícula, estaremos destinados a salirnos de la carretera. Pero se pueden cambiar varios parámetros al mismo tiempo.

Con el objeto de buscar conjuntos alternativos de leyes que sigan permitiendo la aparición de estructuras complejas capaces de engendrar vida, uno de los autores (Pérez) y sus colaboradores no se limitaron a realizar pequeños cambios en las leyes físicas que conocemos, sino que eliminaron de plano una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza.

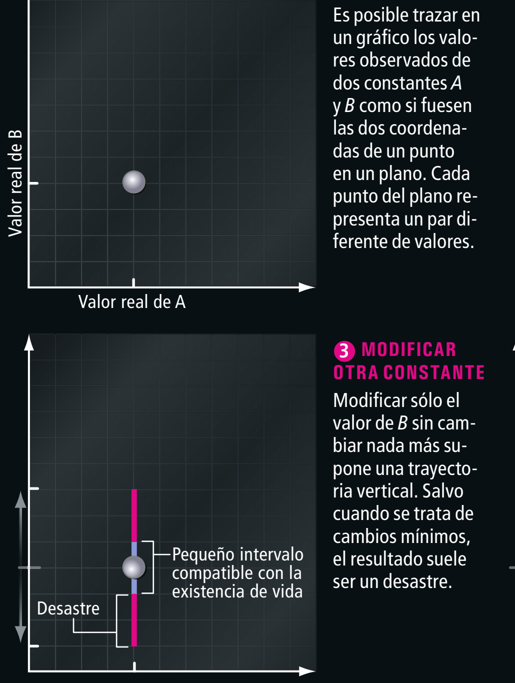
Su propio nombre de fuerzas fundamentales parece indicar que las cuatro que hay en el nuestro son indispensables para cualquier universo que se precie. Sin la interacción fuerte (la responsable de ligar los quarks para formar protones y neutrones y, a su vez, de unir a éstos para constituir núcleos atómicos), la materia tal y como la conocemos no existiría. Sin la fuerza electromagnética no habría luz, ni átomos, ni enlaces químicos. En ausencia de gravedad, no existiría ninguna fuerza que juntase la materia y creara así galaxias, estrellas o planetas.

La cuarta fuerza, la interacción nuclear débil, aunque tiene una presencia más sutil en nuestra vida cotidiana, ha desempeñado un papel fundamental en la historia de nuestro universo. Entre otras cosas, la interacción débil hace posibles las reacciones que convierten neutrones en protones, y viceversa. En los primeros instantes tras la gran explosión, después de que los quarks (una de las primeras formas de materia que aparecieron) se hubiesen unido en grupos de tres para crear protones y neutrones, denominados en conjunto bariones, la interacción débil hizo posible que la fusión de cuatro protones crease núcleos de helio-4, formados por dos protones y dos neutrones. Este proceso se denomina nucleosíntesis primordial.

La nucleosíntesis primordial se produjo cuando el universo contaba con pocos segundos de vida y ya estaba lo suficientemente frío para permitir la formación de bariones y, al mismo tiempo, lo suficientemente caliente para que los bariones pudieran fusionarse en núcleos atómicos. Durante la nucleosíntesis primordial se produjeron el hidrógeno y el helio con los que luego se formarían las estrellas, y en éstas, mediante la fusión nuclear y otros procesos, se generarían casi todos los demás elementos existentes. La fusión de cuatro protones para producir núcleos de helio-4

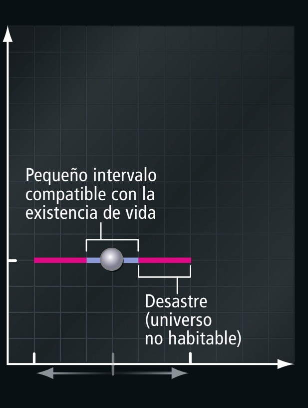
¿COMO ENCONTRAR UNIVERSOS HABITABLES?

Muchas de las características que observamos en las leyes de la naturaleza parecen estar finamente ajustadas: un pequeño cambio en cualquiera de las constantes que aparecen en las ecuaciones de la física conduce, típicamente, a un "desastre": impide la formación de átomos; o la materia se dispersa tanto por el espacio, que no puede condensarse para formar galaxias, estrellas o planetas. Sin embargo, al cambiar dos constantes a la vez, es posible conseguir, en algunos casos, conjuntos de valores que son compatibles con la formación de estructuras complejas y, quizás, incluso con algunas formas de vida inteligente. Cambiar tres o más constantes aumenta aún más el rango de posibilidades.



1 DOS CONSTANTES

Es posible trazar en un gráfico los valores observados de dos constantes *A* y *B* como si fuesen las dos coordenadas de un punto en un plano. Cada punto del plano representa un par diferente de valores.



2 MODIFICAR UNA CONSTANTE

Modificar el valor de *A* (sin alterar nada más) queda representado por una trayectoria horizontal. En condiciones normales, los cambios que van más allá de un pequeño rango de valores acaban en algún desastre y el universo resultante no es apto para la vida.

3 MODIFICAR OTRA CONSTANTE

Modificar sólo el valor de *B* sin cambiar nada más supone una trayectoria vertical. Salvo cuando se trata de cambios mínimos, el resultado suele ser un desastre.



4 CAMBIAR AMBAS CONSTANTES

Al cambiar *A* y *B* a la vez (por ejemplo, moviéndonos en una diagonal) podemos obtener nuevos conjuntos de valores compatibles con la existencia de vida. Lejos de los valores conocidos podría haber más "islas" de valores aptos para la vida.

LUCY READING-IKKANDA

sigue produciéndose hoy en el interior del Sol, donde se genera la mayor parte de la energía que nos envía.

De ese modo, en ausencia de la fuerza nuclear débil, parece improbable que un universo pueda contener nada que se parezca a una química compleja, por no hablar de la vida. No obstante, en 2006, el equipo de Pérez descubrió un conjunto de leyes físicas basado en las otras tres fuerzas, pero capaz de engendrar un universo habitable.

Al eliminar la fuerza nuclear débil, fue necesario introducir varias modificaciones en el modelo estándar de la física de partículas (la teoría que describe todas las interacciones, excepto la gravedad). El equipo de investigadores demostró que es posible realizar los ajustes de tal modo que el comportamiento de las otras tres fuerzas (y de otros parámetros fundamentales, como las masas de los quarks) remedara el de nuestro mundo. Debemos subrayar aquí que se trata de una elección conservadora, cuyo único propósito era facilitar los cálculos que determinarían el desarrollo posterior de ese universo. Resulta bastante probable que exista un amplio rango de universos sin fuerza nuclear débil que sean habitables, pero que no se parezcan en absoluto al nuestro.

En un universo sin interacción débil, la fusión de cuatro protones para dar núcleos de helio sería imposible, dado que requiere que dos protones se conviertan en neutrones. Existen, sin embargo, caminos alternativos para la creación de elementos químicos. Por ejemplo, nuestro universo contiene muchísima más materia que antimateria, pero un pequeño ajuste en el parámetro que regula tal asimetría basta para que la nucleosíntesis primordial genere una cantidad suficiente de núcleos de deuterio. El deuterio, también conocido como hidrógeno-2, es el isótopo cuyo núcleo consta, además del protón habitual, de un neutrón adicional. Las estrellas podrían brillar entonces fusionando un protón y un núcleo de deuterio para formar núcleos de helio-3, que constan de dos protones y un neutrón.

Estas estrellas serían más frías y menores que las existentes en nuestro universo. De acuerdo con las simulaciones por ordenador de Adam Burrows, de la Universidad de Princeton, brillarían durante unos siete mil millones de años (aproximadamente, la edad actual de nuestro Sol) y radiarían energía a un ritmo que sería sólo un pequeño porcentaje del ritmo del Sol.

La siguiente generación

Al igual que las estrellas de nuestro universo, las estrellas sin interacción débil sintetizarían los elementos pesados de la tabla periódica hasta el hierro mediante sucesivas fusiones nucleares. Sin embargo, las reacciones típicas que en nuestro universo dan lugar a elementos más pesados que el hierro quedarían suprimidas, debido principalmente a que no habría suficientes neutrones disponibles para que los núcleos pudiesen capturarlos y formar así isótopos de masa mayor, el primer paso en la formación de elementos más pesados. Con todo, en esas estrellas podrían sintetizarse pequeñas cantidades de elementos pesados (hasta el estroncio) a través de otros mecanismos.

En nuestro universo, las explosiones de supernovas son las que dispersan hacia el espacio exterior los elementos químicos sintetizados en las estrellas. Las supernovas pueden ser de distintos tipos, pero en un universo sin interacción débil no habría explosiones de supernovas provocadas por el colapso de estrellas de masa muy grande; es la emisión de neutrinos, generados por la fuerza débil, la que transmite desde el núcleo estelar la energía que alimenta la onda de choque de la explosión. Pero sí podría darse otro tipo de supernova: el que consiste en la explosión termonuclear de una estrella, sólo que esta vez causada por acreción de masa, no por colapso gravitatorio. De ese modo se dispersarían también los elementos químicos hacia el espacio exterior, donde formarían nuevas estrellas y planetas.

Dado que las estrellas serían más frías en un universo sin interacción débil, un planeta análogo a la Tierra tendría que estar situado unas seis veces más cerca de su respectivo sol para alcanzar la misma temperatura que nuestra Tierra. A los habitantes de un planeta tal, su sol les parecería mucho mayor que el nuestro. Las "Tierras" de un universo sin interacción débil diferirían de la nuestra, además, en otros aspectos. En nuestro planeta, la tectónica de placas y la actividad volcánica están impulsadas por la desintegración radiactiva del uranio y del torio, que se encuentran en las profundidades de la Tierra. En ausencia de esos elementos pesados, una Tierra sin interacción débil tendría una geología más aburrida y monótona (a menos que procesos de tipo gravitatorio proporcionasen una fuente alternativa de calentamiento, como ocurre en algunas lunas de Júpiter y Saturno).

La química, por otra parte, sería bastante parecida a la de nuestro mundo. Una diferencia sería que la tabla periódica acabaría en el hierro, exceptuando trazas pequeñísimas de otros elementos. Sin embargo, esta limitación no debería impedir la aparición de formas de vida similares a las que conocemos. Así pues, incluso un universo con sólo tres fuerzas fundamentales podría acoger vida.

OTRAS NOCIONES DE "UNIVERSOS PARALELOS"

Los físicos y los cosmólogos hablan de universos paralelos en diferentes contextos. Existen al menos otras tres nociones de multiverso distintas de la descrita en este artículo.

▼ BURBUJA DE HUBBLE

Nuestro universo es probablemente mucho mayor que la parte que podemos observar, nuestra "burbuja de Hubble". Si es infinito, debería haber infinitas burbujas de Hubble (centradas en eventuales observadores que viviesen en galaxias remotas). Algunas podrían ser idénticas a la nuestra, con un lector como usted leyendo este mismo artículo.

"Burbuja de Hubble"

▼ BRANAS

Si el espacio tiene más de tres dimensiones, nuestro universo podría constituir una de entre muchas membranas tridimensionales o "branas" de un espacio multidimensional mayor. Los "universos paralelos" podrían interaccionar entre sí e incluso colisionar.



Branas paralelas

▼ LA HIPOTESIS DE LOS MULTIPLES MUNDOS

En física cuántica un mismo objeto puede existir simultáneamente en distintos estados (como el famoso gato que está vivo y muerto a la vez), y sólo una medición externa lo fuerza a adoptar un estado concreto. Algunos físicos creen que todos los estados posibles continúan existiendo, cada uno en una versión separada y "ramificada" del universo.



El gato de Schrödinger

NASA (*"burbuja de Hubble"*); LUCY READING-IKKANDA (*branas y gato*)

BREVE HISTORIA DE UN UNIVERSO ALTERNATIVO

Podría parecernos sorprendentemente familiar incluso un universo con tres interacciones fundamentales, en vez de las cuatro del nuestro. El procedimiento para construirlo es el siguiente:

- Eliminar la interacción nuclear débil modificando varias "constantes" del modelo estándar de la física de partículas.
- Mantener las otras tres interacciones tal y como son en nuestro universo.
- Modificar otros parámetros para hacer posible la fusión nuclear en las estrellas.

El resultado es un universo con estructuras complejas que podría albergar formas de vida similares a las que se dan en la Tierra.

4 INTERACCIONES
Electromagnética
Gravitatoria
Nuclear fuerte
Nuclear débil
u Arriba
d Abajo
Quarks
Neutrón
Protón
Protón
Positrones
Helio 4
Neutrinos

NUESTRO UNIVERSO	▲ Aparecen las partículas elementales y las cuatro fuerzas fundamentales. La temperatura es tan alta, que la interacción débil impide que las partículas de materia tengan masa.	El enfriamiento disminuye la intensidad de la interacción débil, con lo que las partículas de materia adquieren masa.	▲ Los quarks arriba y abajo se combinan para dar protones (núcleos de hidrógeno) y neutrones.	▲ Algunos protones se fusionan en núcleos de helio-4. Esta reacción depende de la interacción débil para transformar los protones en neutrones, positrones y neutrinos.
	10^{-40} SEGUNDOS	10^{-12} SEGUNDOS	10^{-6} SEGUNDOS	1 SEGUNDO–3 MINUTOS
UNIVERSO ALTERNATIVO	▼ Aparecen menos partículas elementales, pero las partículas de materia ya tienen masa.		▼ Los quarks *arriba* y *abajo* se combinan en protones y neutrones.	▼ Algunos protones y neutrones se fusionan para dar deuterio y, posteriormente, núcleos de helio-3. Los protones no se pueden transformar en neutrones.

3 INTERACCIONES
(La interacción nuclear débil no existe)
Electromagnética
Gravitatoria
Nuclear fuerte
u Arriba
d Abajo
Quarks
Neutrón
Protón
Neutrón
Deuterio
Helio 3
Protón
Protón

Una segunda línea de investigación, llevada a cabo por otro de los autores (Jenkins) y sus colaboradores, busca conjuntos alternativos de leyes mediante otras modificaciones del modelo estándar, menores que las del caso del universo sin interacción débil pero recurriendo igualmente al ajuste de varios parámetros a la vez. En 2008, el grupo estudió hasta qué punto las masas de los tres quarks más ligeros (los denominados *arriba, abajo* y *extraño*) de los seis existentes pueden variar sin que se vuelva imposible una química orgánica. Cambiar las masas de los quarks afecta forzosamente a los tipos de bariones y de núcleos atómicos que pueden existir sin desintegrarse rápidamente. A su vez, un conjunto diferente de núcleos atómicos afecta a los tipos posibles de química.

Puede que tengamos que aprender más sobre otros universos para entender nuestro verdadero lugar en el multiverso.

Química de quarks

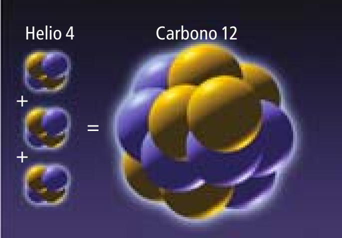
Parece lógico pensar que la existencia de vida inteligente (a menos que sea muy diferente de nosotros) requiera alguna forma de química orgánica, y ésta, por definición, es la química del carbono. Las propiedades químicas del carbono derivan de la carga eléctrica de su núcleo: igual a 6, lo que significa que, en un átomo de carbono neutro, orbitan seis electrones en torno al núcleo. Esas propiedades le permiten formar una variedad inmensa de moléculas complejas. (La idea de una vida basada en el silicio —el elemento siguiente en el grupo del carbono en la tabla periódica— es cuestionable. No se conoce ningún tipo de moléculas basado en silicio que presente algún grado significativo de complejidad.)

Por otra parte, la formación de moléculas orgánicas complejas requiere, además, la presencia de elementos con la química del hidrógeno (carga 1) y del oxígeno (carga 8). Así, para investigar la posible existencia de una química orgánica, el equipo de investigadores tuvo que calcular si los núcleos atómicos de cargas 1, 6 y 8 se desintegrarían radiactivamente antes de que llegasen a participar en reacciones químicas (*véase el recuadro* "Jugar con la materia").

La estabilidad de un núcleo depende en parte de su masa, la cual, a su vez, depende de las masas de los bariones que lo constituyen. Calcular las masas de los bariones y de los núcleos a partir de las masas de los quarks es una tarea extremadamente difícil, incluso en nuestro universo. Sin embargo, tras cambiar la intensidad de las interacciones entre quarks, podemos usar las masas de los bariones tal y como han sido medidas en nuestro universo para estimar de qué modo cambios ligeros en la masa de los quarks repercutirían en las masas de los núcleos.

SLIM FILMS

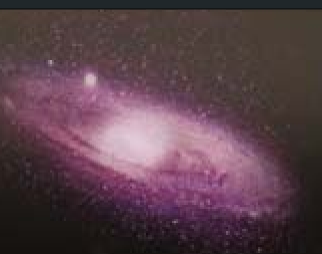


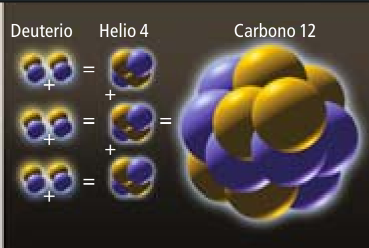


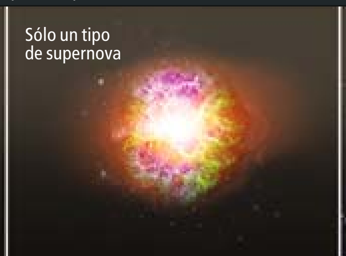


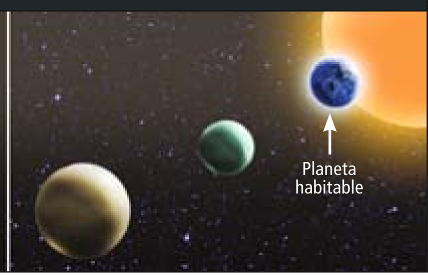


▲ Se forman las primeras estrellas, las galaxias y más estrellas. Estas arden principalmente por la fusión del hidrógeno para producir más helio-4.	▲ Las estrellas fusionan helio-4 y producen así carbono y otros elementos de la tabla periódica, hasta llegar al hierro. Otros procesos generan elementos más pesados que el hierro.	▲ Algunas estrellas colapsan y se convierten en supernovas. Otras explotan tras absorber materia (un tipo diferente de supernova). Las supernovas dispersan los elementos químicos en el espacio.	▲ Se forma el sistema solar. La Tierra es el tercer planeta más cercano al Sol.	Aparecen criaturas inteligentes y comienzan a preguntarse por qué su universo es como es.
150.000 AÑOS-7000 MILLONES DE AÑOS		**7000 MILLONES DE AÑOS**	**8000 MA**	**13.700 MA**
▼ Se forman las primeras estrellas, las galaxias y más estrellas. Las estrellas son más frías y arden, sobre todo, fusionando deuterio e hidrógeno para dar más helio-3.	▼ Las estrellas generan algo de helio-4 fusionando núcleos de deuterio. El helio se fusiona para dar carbono y los demás elementos hasta el hierro. Los elementos más pesados están prácticamente ausentes.	▼ Las estrellas que colapsan no pueden convertirse en supernovas. Pero otras sí pueden convertirse en supernovas y explotar después de absorber materia, dispersando de ese modo también los elementos por el espacio.	▼ Se forma el sistema solar. Para ser habitable, un planeta ha de estar más cerca de su débil sol que Mercurio del nuestro.	Aparecen criaturas inteligentes y comienzan a preguntarse por qué su universo es como es.









En nuestro mundo, el neutrón es aproximadamente un 0,1 por ciento más pesado que el protón. Si las masas de los quarks fueran tales que el neutrón resultase un 2 por ciento más pesado que el protón, no existiría ninguna forma de carbono u oxígeno suficientemente estable. Por otro lado, si las masas de los quarks se ajustasen de tal modo que el protón resultase más pesado que el neutrón, entonces el protón del núcleo de un átomo de hidrógeno acabaría capturando al electrón que orbita a su alrededor, y se convertiría en un neutrón: los átomos de hidrógeno no llegarían a existir durante mucho tiempo. Sin embargo, el deuterio o el tritio (hidrógeno-3) aún serían estables, así como algunas formas de oxígeno y de carbono. Hemos encontrado que sólo en el caso de que el protón fuera más pesado que el neutrón en un factor mayor que el 1 por ciento, serían inestables todas las formas de hidrógeno.

Si el deuterio o el tritio reemplazasen al hidrógeno-1, los océanos estarían hechos de agua pesada, dotada de unas propiedades físicas y químicas ligeramente distintas de las del agua ordinaria. Aun así, no parece haber ningún impedimento fundamental para que en estos mundos evolucionase alguna forma de materia orgánica.

En nuestro mundo, el tercer quark más ligero (el quark *extraño*) es demasiado pesado para tomar parte en los procesos de física nuclear. Pero si su masa se viese reducida en un factor de más de 10, los núcleos atómicos podrían estar hechos no sólo de protones y neutrones, sino también de otros bariones formados por quarks *extraños*.

Por ejemplo, el equipo fue capaz de identificar un universo en el que los quarks *arriba* y *extraño* tendrían aproximadamente la misma masa, mientras que el quark *abajo* sería mucho más ligero. En este caso, los núcleos atómicos no constarían de protones y neutrones, sino de neutrones y de otro barión llamado Σ^- ("sigma menos"). Sorprendentemente, incluso un universo tan distinto del nuestro tendría formas estables de hidrógeno, carbono y oxígeno: podría haber una química orgánica. No obstante, la pregunta de si tales elementos se generarían en cantidades suficientes como para permitir la aparición de vida sigue sin respuesta.

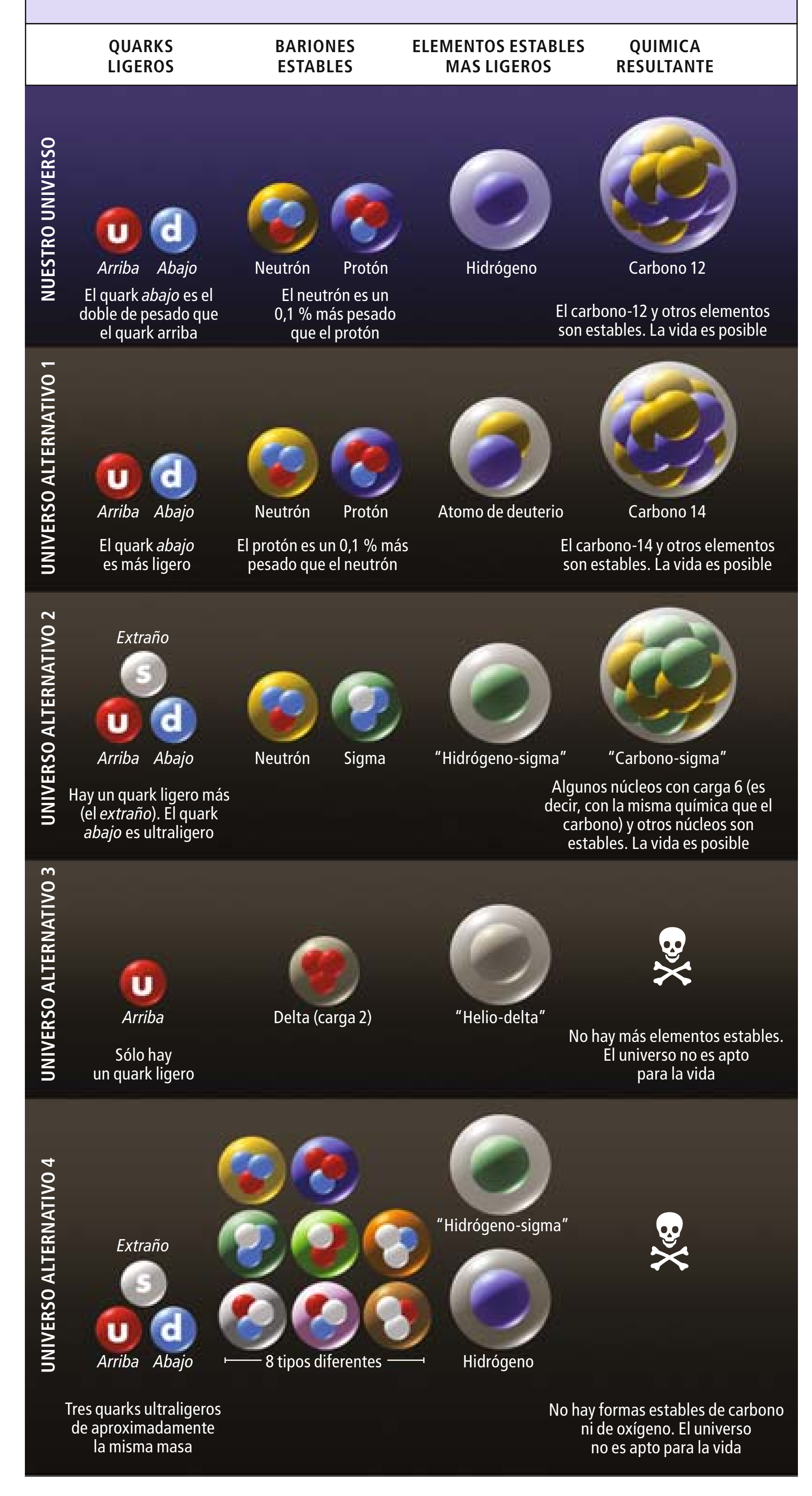
Pero, si se llegase a originar vida, ocurriría de modo muy parecido a como acontece en nuestro universo. Los físicos de un universo tal se sorprenderían de que los quarks *arriba* y *extraño* tuviesen masas casi idénticas. Podrían llegar a imaginar, incluso, que esa increíble coincidencia poseía una explicación antrópica

Los autores

Alejandro Jenkins, natural de Costa Rica, trabaja en el grupo de física de altas energías de la Universidad estatal de Florida. Tiene titulaciones de la Universidad de Harvard y del Instituto de Tecnología de California. Realizó sus investigaciones sobre universos alternativos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts junto a Bob Jaffe e Itamar Kimchi. **Gilad Pérez** es físico teórico del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovot, donde se doctoró en 2003. Durante su estancia en el Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley investigó el multiverso junto a Roni Harnik, de la Universidad de Stanford, y Graham D. Kribs, de la Universidad de Oregón. También ha trabajado en la Universidad de Stony Brook, la de Boston y Harvard.

JUGAR CON LA MATERIA

Imaginemos la posibilidad de modificar las masas de los quarks ligeros (los que pueden formar bariones estables, como los neutrones y protones). ¿Sería posible obtener los elementos químicos cruciales para la vida tal y como la conocemos? Como mínimo, el universo resultante debería contener núcleos estables de carga eléctrica 1, 6 y 8, ya que son estas cargas las que dotan a los elementos de propiedades similares a las del hidrógeno, el carbono y el oxígeno, respectivamente. He aquí algunos ejemplos de lo que ocurre.



basada en la necesidad de una química orgánica. Sin embargo, nosotros sabemos que tal explicación sería incorrecta, dado que en nuestro universo hay química orgánica aunque las masas de los quarks *arriba* y *extraño* son muy diferentes.

Por otro lado, los universos donde las masas de los tres quarks más ligeros fuesen más o menos iguales no exhibirían seguramente ningún tipo de química orgánica: cualquier núcleo con más de dos unidades de carga eléctrica se desintegraría casi de inmediato. Por desgracia, es muy difícil trazar en detalle las historias de universos cuyos parámetros físicos difieran de los que caracterizan a nuestro universos. Un asunto que merece investigarse más a fondo.

El "paisaje" de la teoría de cuerdas

Algunos físicos teóricos ven en el fenómeno del ajuste fino una prueba indirecta de la existencia del multiverso. De ser así, ¿cuestionan nuestros resultados el concepto de multiverso? Hay dos razones por las que no creemos que haya de ser así. La primera viene de las observaciones combinadas con la teoría. Los datos astronómicos apoyan con solidez la hipótesis de que nuestro universo comenzó siendo una diminuta "parcela" de espaciotiempo, quizá de sólo la milmillonésima parte del tamaño de un protón. Tal volumen experimentó posteriormente una fase de rápido crecimiento exponencial, denominada *inflación*. La cosmología aún no dispone de un modelo teórico definitivo que describa la inflación, pero la teoría sugiere que diferentes "parcelas" podrían haberse hinchado a diferentes ritmos y que cada una podría haber formado una "bolsa", la cual a su vez podría haber llegado a ser un universo en sí mismo, caracterizado por sus propios valores de las diferentes constantes de la naturaleza [*véase* "El universo inflacionario autorregenerante", de Andrei Linde; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 1995).

El espacio entre esos distintos "universos-bolsa" habría continuado expandiéndose tan rápidamente, que resultaría imposible viajar o enviar mensajes desde una "bolsa" a otra ni siquiera a la velocidad de la luz.

La segunda razón para sospechar la existencia del multiverso se debe a que sigue quedando una magnitud que sí parece ajustada con una extraordinaria precisión: la constante cosmológica, el parámetro que representa la cantidad de energía contenida en el espacio vacío. La física cuántica predice que incluso el espacio vacío ha de contener energía; por otro lado, la teoría general de la relatividad de Einstein implica que toda forma de energía es fuente de gravedad. Si la energía del vacío es positiva, provocará una expansión

SLIM FILMS

del espacio a un ritmo de aceleración exponencial. Si es negativa, el universo debería acabar hundiéndose sobre sí mismo en una "gran contracción".

La teoría cuántica parece implicar que la constante cosmológica (positiva o negativa) ha de ser tan grande, que, o bien el espacio debería haberse expandido con suma celeridad y, por consiguiente, las estructuras cósmicas (las galaxias mismas) no habrían tenido tiempo de formarse, o bien el universo debería haber existido sólo durante una fracción de segundo antes de colapsar.

Una forma de explicar la manera en la que nuestro universo evitó esos desastres consiste en presuponer la existencia de algún término adicional en las ecuaciones que cancele los efectos de la constante cosmológica. El problema es que el término en cuestión debería hallarse finamente ajustado, con una precisión extraordinaria. Una pequeña variación incluso en la centésima cifra después de la coma decimal conduciría a un universo sin ninguna estructura relevante.

En 1987, Steven Weinberg, premio Nobel y físico teórico de la Universidad de Texas en Austin, propuso una explicación antrópica para este fenómeno. Calculó el valor máximo de la constante cosmológica compatible con la vida. Para cualquier valor mayor, el espacio se habría expandido tan rápidamente, que el universo carecería ahora de las estructuras necesarias para originar vida. Así, en cierto modo, nuestra sola existencia predice ya el bajo valor de la constante cosmológica.

A finales del decenio de los noventa, los astrónomos descubrieron que el universo se expandía a un ritmo acelerado, empujado por una forma misteriosa de "energía oscura". La tasa de expansión observada implicaba que la constante cosmológica era positiva y muy pequeña (dentro de los límites establecidos por Weinberg), lo que a su vez entrañaba una densidad de energía oscura muy baja.

Así pues, el valor de la constante cosmológica parece estar ajustado con un grado de precisión excepcional. Por otra parte, los métodos que nuestros equipos han aplicado a la interacción nuclear débil y a las masas de los quarks parecen fallar en este caso, dado que se muestra imposible encontrar universos habitables en los que el valor de la constante cosmológica sea significativamente mayor que el valor observado. En un multiverso, la gran mayoría de los universos tendría una constante cosmológica cuyo valor resultaría incompatible con la formación de cualquier tipo de estructura.

Es como si se enviaran a miles de personas a cruzar un desierto montañoso. Los pocos capaces de acabar tal proeza con vida volverían contando historias emocionantes, encuentros con serpientes venenosas y experiencias al borde de la muerte que nos parecerían demasiado apuradas para ser verosímiles.

Argumentos teóricos basados en la teoría de cuerdas (una ampliación especulativa del modelo estándar encaminada a describir todas las interacciones a partir de las oscilaciones de cuerdas microscópicas) parecen confirmar que la pequeñez de la constante cosmológica sería muy poco frecuente en el multiverso. Sostienen que, durante la inflación, la constante cosmológica y los demás parámetros podrían haber tomado un rango virtualmente ilimitado de valores diferentes, lo que se ha dado en llamar el "paisaje" de la teoría de cuerdas [*véase* "El paisaje de la teoría de cuerdas", de Raphael Bousso y Joseph Polchinski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2004].

Sin embargo, nuestro trabajo sí arroja algunas dudas en cuanto a la utilidad del razonamiento antrópico, al menos más allá del caso de la constante cosmológica. También suscita importantes preguntas. Por ejemplo: si la vida es realmente posible en un universo sin interacción débil, ¿por qué hay interacción débil en nuestro universo? La verdad es que los físicos de partículas consideran que, en cierto sentido, la interacción débil no es en nuestro universo lo bastante débil. El valor observado de su intensidad parece anormalmente grande en el contexto del modelo estándar. (La explicación principal de este misterio requiere la existencia de nuevas partículas que se espera poder descubrir en el recientemente inaugurado Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cerca de Ginebra.)

Como resultado, muchos teóricos esperan que una gran mayoría de los universos cuente con interacciones débiles tan poco intensas que, a todos los efectos, sería como si no existiesen. Así, el verdadero problema quizás estribe en tratar de explicar por qué vivimos en un universo *con* interacción débil.

Finalmente, sólo una comprensión más profunda de cómo nace un universo podría responder tales preguntas. En particular, podríamos descubrir principios físicos aún más fundamentales que explicasen por qué la naturaleza prefiere ciertos conjuntos de leyes a otros.

Puede que nunca encontremos ninguna prueba directa de la existencia de otros universos, y lo que sí es seguro es que nunca conseguiremos visitar ninguno de ellos. Pero puede que necesitemos aprender más sobre ellos, si queremos entender cuál es nuestro verdadero papel en el multiverso... o lo que quiera que en realidad haya.

¿HAY ALGUIEN AHI?

Del vacío primordial podrían surgir otros muchos conjuntos de leyes físicas. En la mayoría de los casos, incluidos los que enumeramos abajo, se desconoce si los universos resultantes serían habitables. Las investigaciones futuras quizás arrojen luz sobre el asunto.

UN UNIVERSO DE HELIO
Algunas modificaciones en un universo sin interacción débil producirían un mundo casi sin hidrógeno tras la gran explosión. Las estrellas estarían hechas en su mayor parte de helio.

MULTIQUARKS
En nuestro universo, las partículas están formadas por dos o tres quarks, pero en otros universos podrían constar de cuatro, cinco o más.

DIMENSIONES EXTRA
Según la teoría de cuerdas, el espacio tiene nueve dimensiones. En nuestro universo, todas, salvo tres, habrían de estar enrolladas o ser, de algún modo, "invisibles". ¿Qué pasaría si cuatro o más dimensiones fueran visibles?

Bibliografía complementaria

A DESIGNER UNIVERSE? Steven Weinberg en *Conference on Cosmic Design of the American Association for the Advancement of Science*; Washington D.C.; abril 1999.

UNIVERSOS PARALELOS. Max Tegmark en *Investigación y Ciencia* 322; julio 2003.

A UNIVERSE WITHOUT WEAK INTERACTIONS. Roni Harnik, Graham D. Kribs y Gilad Pérez en *Physical Review D*, vol. 74, n.º 3, págs. 035006-1- 035006-15; agosto 2006.

QUARK MASSES: AN ENVIRONMENTAL IMPACT STATEMENT. Robert L. Jaffe, Alejandro Jenkins e Itamar Kimchi, en *Physical Review D*, vol. 79, n.º 6, págs. 065014-1-065014-33; marzo 2009.

APOGEO Y CAIDA de las nanobacterias

Antaño consideradas patógenos, estas extrañas partículas intervienen en la salud, aunque no con la función que se les atribuía

John D. Young y Jan Martel

CONCEPTOS BASICOS

- El descubrimiento de unas supuestas bacterias nanométricas provocó estupor y entusiasmo porque parecían demasiado pequeñas para albergar vida.
- Las afirmaciones en torno a los patógenos más diminutos avanzaron por delante de la validación científica, hasta que los autores, junto a otros expertos, demostraron que, aunque las partículas parecían vivas, correspondían a meras cristalizaciones aberrantes de minerales y moléculas orgánicas.
- No obstante, las interacciones entre minerales y proteínas que producen las nanopartículas revelan detalles sobre procesos que protegen o debilitan la salud humana.

Los datos sobre la existencia de vida en Marte, aunque se refieran sólo a un pasado muy remoto, darían por fin respuesta a la antiquísima cuestión de si los seres vivos de la Tierra se encuentran solos en el universo. La magnitud de un descubrimiento de esas características queda reflejada en la comparecencia en rueda de prensa que el presidente Bill Clinton protagonizó en 1996 para anunciar que, por fin, se habían encontrado pruebas. Un meteorito que se desprendió de la superficie del Planeta Rojo, hace unos 15 millones de años, parecía contener los restos fósiles de diminutas formas de vida que indicaban que en algún momento existió vida en Marte.

Las investigaciones geológicas que demostraban que seres semejantes, menores que cualquier organismo hallado (o imaginado) anteriormente, habrían moldeado la superficie primitiva de la Tierra sugirieron que los especímenes de marras podrían ser vestigios del origen de la vida. La única noticia que podría ensombrecer tales descubrimientos llegaría más tarde, cuando se hallaron pruebas que indicaban que esos seres ancestrales, que acabarían denominándose nanobacterias, pervivían entre nosotros, habitando en nuestro organismo y causando enfermedades.

Cuando esos hallazgos se hicieron públicos, numerosos científicos reaccionaron con escepticismo. Había indicios que apuntaban hacia la posibilidad de que el entusiasmo de los descubridores fuera más deprisa que la comprobación de los datos. Quedaban todavía cuestiones pendientes sobre qué eran y qué no eran realmente las nanobacterias.

Después de más de un decenio, el conocimiento sobre esas partículas infinitésimas y su extraño comportamiento, que recuerda al de los seres vivos, ha avanzado de forma notable. Sabemos ahora que las nanobacterias no son nuevos y exóticos patógenos. Ni siquiera son seres vivos. Mas no por ello son menos importantes para la salud de los humanos. Podrían haber desempeñado una función en la evolución temprana de la vida; aunque no como en un principio se había supuesto.

Lo sucedido con las nanobacterias nos ofrece lecciones de interés sobre el desarrollo de la ciencia y sobre cómo pueden torcerse las cosas. Lo mismo que en todo relato que se precie, su final en la vida real entraña mayor atractivo que en la ficción. Los expertos utilizan hoy el conocimiento sobre esas entidades nanoscópicas para avanzar en el campo de la salud humana y en la investigación sobre nanomateriales.

¿Demasiado pequeñas para estar vivas?

En 1993, Robert L. Folk, de la Universidad de Texas en Austin, había estado trabajando con muestras de roca procedentes de los manantiales termales de Viterbo, en Italia, cuando describió lo que él denominó

"nannobacterias". Mientras examinaba las muestras con un microscopio electrónico, Folk descubrió esferas diminutas que parecían restos fósiles de bacterias. Lo mismo que las bacterias, esas pequeñas gotitas parecían disponer de paredes celulares y prolongaciones filamentosas en la superficie. Sin embargo, las esferas de Folk eran mínimas, mucho menores que cualquier bacteria conocida.

Las bacterias suelen medirse en micras. (Una micra equivale a la millonésima parte de un metro, una centésima parte del diámetro de un cabello.) Los fósiles observados por Folk eran entre cinco y 100 veces menores que una bacteria común, con un tamaño que oscilaba entre los 10 y los 200 nanómetros. (Un nanómetro equivale a la milésima parte de una micra.) Folk halló esas entidades nanoscópicas entre los restos de antiguos estratos geológicos, que incluían algunos procedentes del Paleozoico y Mesozoico, períodos considerados anteriores a la aparición de la vida sobre la Tierra. Propuso que la alternancia que mostraban esos seres entre materia orgánica e inorgánica habría dado lugar a los mismos estratos geológicos en los que fueron encontrados.

Los hallazgos de Folk pasaron inadvertidos durante mucho tiempo, hasta que, en 1996, David S. McKay, del Centro Espacial Lyndon B. Johnson de la NASA en Houston, publicó datos que indicaban que un meteorito procedente de Marte y descubierto en la Antártida, denominado ALH84001, presentaba nanofósiles similares.

1. NANOPARTICULAS formadas por la unión de proteínas a iones minerales en proceso de cristalización. Observadas al microscopio electrónico, guardan semejanza con células bacterianas en división.



La roca, que parece haberse formado hace unos 4500 millones de años a partir de materiales fundidos, es una de las más viejas del sistema solar. Además de diminutas esferas de carbonato semejantes a las *nannobacterias* de Folk, McKay y sus colaboradores identificaron en el meteorito partículas de magnetita y de sulfuro de hierro, junto con hidrocarburos aromáticos policíclicos, todos ellos materias primas implicadas en procesos biológicos. Tales observaciones se esgrimieron como pruebas demoledoras que demostraban la posible existencia de vida previa en Marte y en otros lugares del sistema solar.

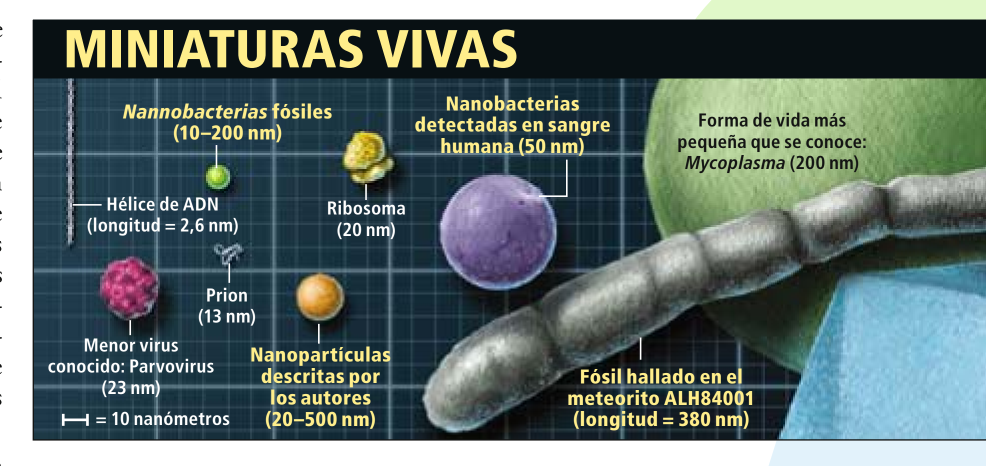
El informe de McKay y, en consecuencia, los trabajos anteriores de Folk, fueron recibidos con gran alboroto por los medios de comunicación; en los círculos científicos, generaron dudas y controversias. Los críticos advirtieron que las afirmaciones realizadas hasta la fecha en torno a esas entidades diminutas se habían basado sólo en su aspecto, sin contar con pruebas que demostraran que en algún momento hubiesen estado vivas. Asimismo, los especímenes nanoscópicos avivaron el debate sobre el tamaño mínimo necesario para mantener la vida en un organismo unicelular. Dado que una doble hebra de ADN mide más de dos nanómetros de diámetro y que la sección transversal de los ribosomas que fabrican proteínas en el interior de una célula es de unos 20 nanómetros, se cuestionaba que una "célula" nanoscópica pudiese albergar el equipamiento necesario para la vida.

En el punto álgido de la controversia, E. Olavi Kajander y Neva Çiftçioğlu, de la Universidad finesa de Kuopio, plantearían un debate de mayor trascendencia todavía. En 1998, el equipo finlandés proporcionó la primera prueba de que las nanobacterias eran seres vivos. Habían venido examinando pequeños "contaminantes" en sus cultivos celulares que resultaron ser resistentes a todo empeño en eliminarlos. Las partículas en cuestión no sólo estaban provocando enfermedades en las células cultivadas, sino que parecían, además, resistir las técnicas de esterilización habituales basadas en tratamientos con calor, detergentes y antibióticos. A partir de la observación de los diminutos cuerpos esféricos con un microscopio electrónico, Kajander y Çiftçioğlu descubrieron que su tamaño se incluía entre 50 y 500 nanómetros; asimismo, guardaban una extraordinaria semejanza con las *nannobacterias* de Folk. Debía tratarse de la misma entidad.

Los patógenos más pequeños

Tras un análisis más detallado, los investigadores finlandeses descubrieron, en las partículas,

MINIATURAS VIVAS



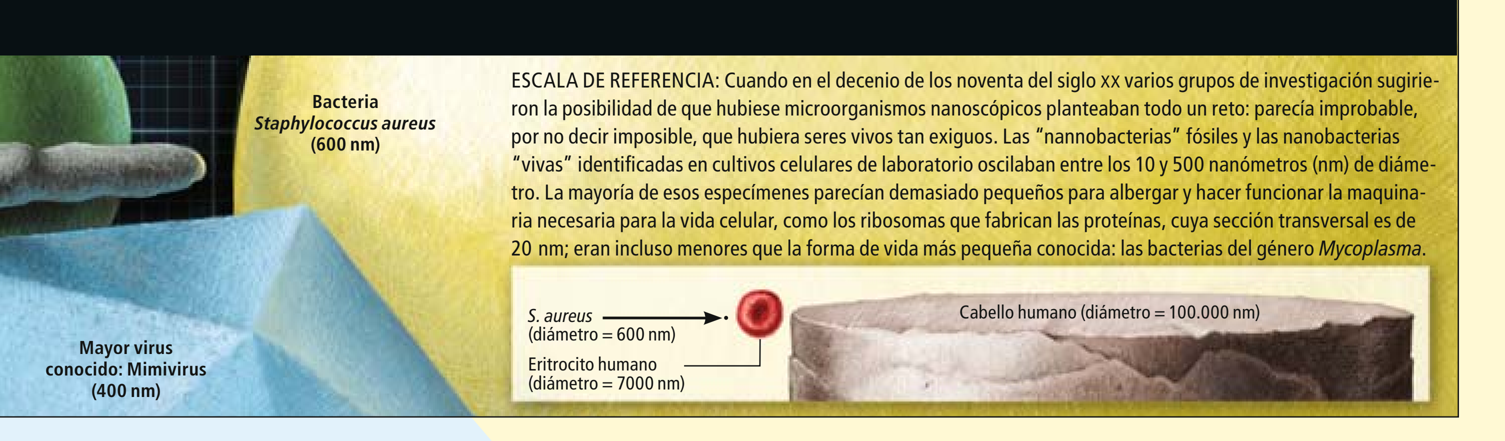


2. **ALLAN HILLS 84001 (*arriba*), un meteorito descubierto en la Antártida, contiene nanoesferas y formaciones alargadas (*izquierda*) compuestas por carbonato, así como elementos que sirven de materia prima para los procesos biológicos.**

Entusiasmo prematuro

Las estructuras compuestas por carbonatos que se atribuyeron a restos fósiles de bacterias nanoscópicas se describieron en 1993. Las esferas identificadas por Robert L. Folk en muestras de roca procedentes de Italia (*derecha*) tenían una sección transversal de entre 10 y 200 nanómetros. Pero su hallazgo no despertó interés hasta 1996, cuando científicos de la NASA observaron fósiles similares en un meteorito originado en Marte (*izquierda*). La perspectiva de que una roca con más de 4000 millones de años de antigüedad presentase pruebas de vida extraterrestre despertó la atención. La relevancia potencial del descubrimiento llevó al presidente Bill Clinton a declarar: "Hoy, tras miles de millones de años y a través de millones de kilómetros de distancia, la roca 84001 nos está hablando. Nos habla de la posibilidad de que haya vida. Si se confirma, será, seguramente, uno de los descubrimientos más espectaculares que la ciencia haya realizado nunca sobre nuestro universo".

TRAVIS HEYING AFP/NEWSCOM (*meteorito*); CORTESIA DE NASA (*SEM*); CORTESIA DE ROBERT L. FOLK *Universidad de Texas en Austin* (*cristal de calcita*)



ESCALA DE REFERENCIA: Cuando en el decenio de los noventa del siglo XX varios grupos de investigación sugirieron la posibilidad de que hubiese microorganismos nanoscópicos planteaban todo un reto: parecía improbable, por no decir imposible, que hubiera seres vivos tan exiguos. Las "nannobacterias" fósiles y las nanobacterias "vivas" identificadas en cultivos celulares de laboratorio oscilaban entre los 10 y 500 nanómetros (nm) de diámetro. La mayoría de esos especímenes parecían demasiado pequeños para albergar y hacer funcionar la maquinaria necesaria para la vida celular, como los ribosomas que fabrican las proteínas, cuya sección transversal es de 20 nm; eran incluso menores que la forma de vida más pequeña conocida: las bacterias del género *Mycoplasma*.

JEN CHRISTIANSEN

ácidos nucleicos y proteínas, señales de vida. Basándose en las secuencias de ADN encontradas en las muestras, asignaron *Nanobacterium sanguineum*, como denominaron a su descubrimiento, a un subgrupo de bacterias que incluye a *Brucella* y *Bartonella*, dos géneros patógenos. El grupo finlandés observó también características atípicas en las nanobacterias, incluida su capacidad para cambiar de forma en los cultivos (pleomorfismo), un rasgo poco frecuente en los seres vivos.

Se vio que los corpúsculos esféricos de las nanobacterias se convertían en películas y aglomerados de material mineralizado. El mineral en cuestión resultó ser hidroxiapatito (apatito), un complejo cristalino de calcio y fosfato que se encuentra por doquier en la naturaleza (en los huesos de mamíferos y las conchas de algunos invertebrados). Las pequeñas y redondeadas nanobacterias no sólo estaban recubiertas por paredes de apatito, sino que se las encontraba a menudo escondidas en el interior de grandes "castillos con forma de iglú" o "habitáculos".

Al tratar de identificar el origen de las nanobacterias, el equipo finlandés se llevó una sorpresa: hallaron tales nanoentidades en la mayoría de los fluidos corporales, de animales, hombre incluido, que analizaron (sangre, saliva y orina, entre otros). Y llegaron a la conclusión de que entrañaban un factor de riesgo para enfermedades causadas por aglomeraciones minerales anormales, como los cálculos renales. Al final, la lista de enfermedades asociadas a las nanobacterias se ampliaría hasta abarcar numerosos tipos de cáncer, ateroesclerosis, trastornos degenerativos (artritis, esclerodermа, esclerosis múltiple, neuropatía periférica y la enfermedad de Alzheimer) e infecciones víricas, como el sida.

Los estudios iniciales llevados a cabo por el equipo finlandés habían demostrado que el 14 por ciento de los adultos escandinavos sanos poseían anticuerpos contra las nanobacterias. Posteriormente, Andrei P. Sommer, de la Universidad de Ulm, y otros avanzarían la tesis de que las nanobacterias se comportaban como patógenos transmisibles, con lo que se las acusaba de constituir un riesgo para la salud.

A pesar de tan aterradoras implicaciones, las nanobacterias satisfacían, desde muchos puntos de vista, las aspiraciones más deseadas por cualquier científico. Su naturaleza primitiva, rasgos exóticos y distribución ubicua inducían a esperar que arrojaran luz sobre el origen de la vida, no sólo en la Tierra sino también en otras partes del cosmos. Además, representarían un nuevo principio unificador de las enfermedades, al estar relacionadas con cualquier tipo de enfermedad imaginable, un escenario sin precedentes.

Mas, pese a todas las características extraordinarias atribuidas a las nanobacterias, muchos críticos permanecían en su escepticismo. Uno de los expertos que consideraba las nanobacterias demasiado pequeñas para ser reales, Jack Maniloff, de la Universidad de Rochester, las definió como "la fusión fría de la microbiología".

Para 2000, las investigaciones dirigidas por John O. Cisar, del estadounidense Instituto Nacional de la Salud, aportaron la primera visión alternativa sobre las nanobacterias. Cisar descubrió que los fosfolípidos (componentes habituales de las membranas celulares) se unían tanto al calcio como al fosfato, lo que fomentaba la formación de cristales de calcio y fosfato (apatito). Los agregados cristalinos así generados guardaban una extraña semejanza con las nanobacterias descritas por el grupo finlandés.

No sin sorpresa, se observó que esas mismas gotitas cristalinas crecían y se multiplicaban en el tubo de ensayo, como si estuviesen vivas. En cuanto a la presencia de secuencias únicas de ácidos nucleicos, que previamente habían sido consideradas características fundamentales de las nanobacterias, el estudio de Cisar demostró que idénticas secuencias aparecían en el genoma de bacterias comunes que, con

Los autores

John D. Young es catedrático de la Universidad Chang Gung (CGU) y de la Universidad Mingchi de Tecnología en Taiwán; dirige el Laboratorio de Nanomateriales de la CGU. Centra su interés en las interacciones entre materiales orgánicos e inorgánicos, con sus repercusiones sobre la salud. Colabora con el Laboratorio de Inmunología Molecular y Biología Celular de la Universidad Rockefeller, del que fue director. **Jan Martel** prepara su tesis doctoral en el Instituto Universitario de Ciencias Biomédicas de la CGU. Investiga los patógenos presentes en la sangre y el desarrollo de terapias alternativas.

frecuencia, contaminaban el material de vidrio y los reactivos de laboratorio.

El fervor por las nanobacterias empezó a perder intensidad. En 2004 y de forma repentina, un equipo de la Clínica Mayo encabezado por Virginia Miller y John C. Lieske afirmó haber encontrado nanopartículas, en especímenes de vasos sanguíneos calcificados, que no sólo albergaban ADN y proteínas sino que también parecían sintetizar ARN, las moléculas intermediarias que los organismos utilizan para convertir las instrucciones del ADN en proteínas celulares. De la noche a la mañana, se reavivó el debate sobre las nanobacterias.

Consideradas prototipos de un nuevo mecanismo patogénico, quizá parecidas a los priones (las partículas de naturaleza proteica responsables de trastornos como la enfermedad de las vacas locas), las nanobacterias representaban ahora una amenaza para la salud pública. Ello estimuló la venta de métodos para la detección y el tratamiento de tales patógenos. Nanobac OY, una compañía fundada por los científicos finlandeses que descubrieron las nanobacterias "vivas", se convirtió en un importante suministrador de reactivos, entre los que se incluían anticuerpos, diseñados para la detección de nanobacterias en tejidos humanos. Posteriormente, Nanobac Pharmaceuticals, una compañía afincada en Florida que absorbió Nanobac OY en 2003, se convirtió en un proveedor de medicamentos para las "infecciones" nanobacterianas.

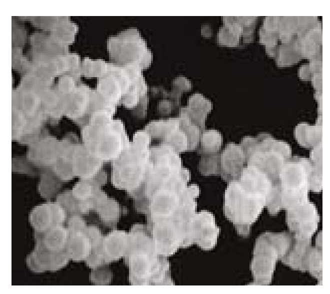
Construcción de nanobacterias

Intrigados por las extraordinarias afirmaciones, réplicas y contrarréplicas en torno al comportamiento de las nanobacterias, nuestro grupo de investigación se embarcó en 2007 en una serie de experimentos; nos centramos en el análisis exhaustivo de la naturaleza química y biológica de las partículas de marras. Creíamos que, antes de discutir sobre su función en la enfermedad, debíamos establecer qué eran y qué no eran aquellas nanoestructuras, así como determinar si gozaban de vida. Nos dispusimos, pues, a determinar si podían replicarse a partir de materia inerte.

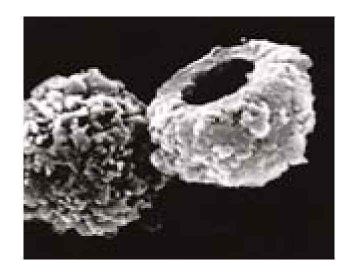
Trabajamos con compuestos sencillos de calcio (carbonato cálcico, o caliza, y fosfato cálcico), sabiendo que poseen una tendencia natural a agregarse con una disposición molecular determinada para formar cristales. Los cristales corresponden a estructuras altamente ordenadas, generadas a partir de un núcleo inicial, que parecen prismas geométricos con superficies planas y aristas afiladas. Mas, si se bloquea su crecimiento, o se le detiene, adquieren propiedades notablemente distintas. Según nuestra hipótesis, si añadíamos a los

PARECEN VIVAS

En 1998, Olavi Kajander y Neva Çiftçioğlu afirmaron haber descubierto bacterias de tamaño nanoscópico cuyo recubrimiento de fosfato cálcico generaba estructuras minerales que reflejaban los cambios de forma y actividad que tenían lugar en la proliferación de las mismas.



En los experimentos del grupo finlandés, las partículas mineralizadas se multiplicaban con lentitud; crecían en las placas utilizadas para cultivar células hasta alcanzar un tamaño que oscilaba entre los 20 y los 500 nanómetros.



Las estructuras huecas de hidroxiapatito observadas en los cultivos fueron interpretadas como "habitáculos" construidos por las nanobacterias mediante la acumulación de minerales.

minerales proteínas y otras sustancias de origen no mineral, se interrumpiría el ordenamiento preciso de los entramados moleculares que se necesitan para iniciar la cristalización. Resultarían, por el contrario, agregados amorfos, vale decir, minerales dotados de una estructura molecular aleatoria o desordenada.

Pensábamos, asimismo, que tal interrupción abortaría el crecimiento cristalino de los agregados minerales. Para nuestra sorpresa, las aglomeraciones minerales continuaron creciendo y propagándose en forma de partículas o, para ser más exactos, de nanopartículas. No esperábamos que esos compuestos tan sencillos adquiriesen con tanta facilidad formas y geometrías que les diesen un aspecto de nanobacteria, con paredes similares a las paredes celulares y, en apariencia, dividiéndose de la misma forma que las bacterias vivas.

Utilizando como trampolín esos sencillos nanoconstructos, acometimos la reconstrucción de la biología de las nanobacterias. En otras palabras, nos preguntábamos si podrían reproducirse todas las propiedades exóticas atribuidas a las nanobacterias mediante la interacción entre minerales y moléculas orgánicas sencillas.

Las partículas compuestas por mezclas de carbonato y fosfato de calcio eran bastante pegajosas. Se unían a cualquier molécula dotada de carga eléctrica: iones, compuestos orgánicos de tamaño moderado (hidratos de carbono), lípidos, ADN y otros ácidos nucleicos. La unión a grupos cargados estabiliza las partículas en crecimiento, las dota de integridad estructural y estimula a las partículas de calcio para que sigan creciendo y adquiriendo formas complejas. Sin embargo, al final prevalece uno de dos escenarios posibles. Si hay un exceso de minerales, las partículas acabarán cristalizando en forma de apatito. Pero si los compuestos orgánicos disponibles superan la concentración local de minerales, la cristalización podrá interrumpirse o continuar lentamente, con lo que las partículas seguirán evolucionando para dar lugar a formas de mayor complejidad.

De entre los grupos químicos dotados de carga que estudiamos, los de naturaleza proteínica mostraron los efectos más interesantes y complejos. Las proteínas cursan libremente por el organismo. La albúmina y la fetuína-A abundan en la sangre; también se unen al calcio con avidez. La albúmina es responsable de la mitad de la capacidad de unión al calcio del suero sanguíneo. La fetuína-A resulta más insólita todavía: no sólo se une al calcio sino también, y con mucha fuerza, al fosfato cálcico que forma parte de los incipientes cristales de apatito.

Es sabido que la unión de esas proteínas a los cristales de apatito que se están empezan-

EN ESTA PAGINA: "NANOBACTERIA: AN ALTERNATIVE MECHANISM FOR PATHOGENIC INTRA- AND EXTRACELLULAR CALCIFICATION AND STONE FORMATION," POR E. OLAVI KAJANDER Y NEVA ÇIFTÇIOĞLU, EN *PNAS*, VOL. 95, N.º 14; 7 DE JULIO DE 1998 (*estructuras minerales*); PAGINA OPUESTA: CORTESIA DE JOHN D. YOUNG Y JAN MARTEL (*las tres micrografías superiores*); "PUTATIVE NANOBACTERIA REPRESENT PHYSIOLOGICAL REMNANTS AND CULTURE BY-PRODUCTS OF NORMAL CALCIUM HOMEOSTASIS," POR JOHN D. YOUNG ET AL., EN *PLOS ONE*, VOL. 4, N.º 2; 9 DE FEBRERO DE 2009 (*las dos micrografías inferiores*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)

Producción de nanobacterias

Los experimentos realizados por los autores pusieron de manifiesto que las interacciones entre minerales, proteínas y otras moléculas inertes que suelen hallarse en los medios de los cultivos celulares daban lugar a partículas (*micrografías*) que, por su aspecto y comportamiento, parecían nanobacterias. Las proteínas interfieren con la cristalización de los iones minerales; cuando ello ocurre, se generan gotitas minerales amorfas que crecen y cambian de forma, igual que lo haría cualquier organismo.

▶ **Unas horas después de añadir los iones al medio de cultivo celular, se observan, a través del microscopio electrónico de barrido, nanopartículas con un diámetro de entre 20 y 50 nanómetros.**

▶ **Esas partículas, de entre 100 y 500 nanómetros, guardan semejanza con células vivas en razón de figura y tamaño uniformes. Parecen nanobacterias.**

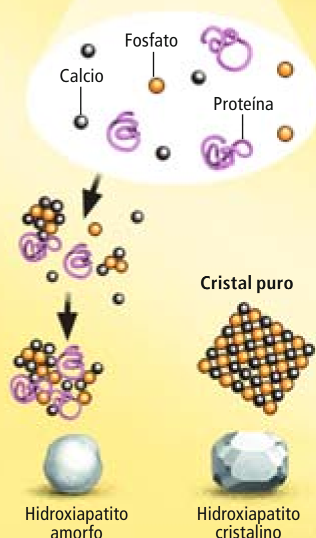
▶ **Para cuando las partículas alcanzan un diámetro de varios cientos de nanómetros, su fusión ininterrumpida da lugar a formas extrañas que, en ocasiones, adoptan la apariencia de células en división.**

▶ **En esas partículas, de 600 nanómetros de espesor, prevalece la cristalización, con lo que se generan pétalos minerales de bordes afilados.**

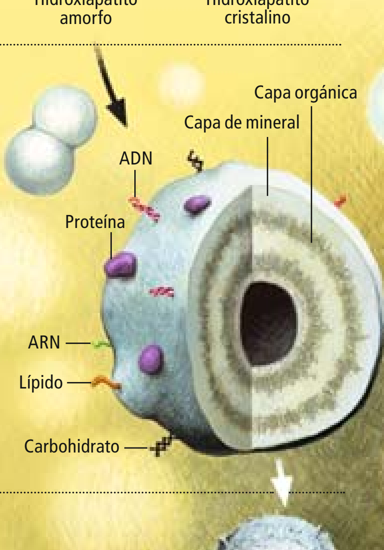
▶ **Por fin, las partículas mineralizadas colapsan para formar mantos sólidos que, en última instancia, recubrirán el fondo de la placa de Petri que contiene el cultivo.**

1 Las placas de Petri que se utilizan para el cultivo de células suelen contener un aditivo rico en nutrientes, como el suero fetal bovino, que incluye proteínas y otras moléculas orgánicas. Para acelerar la formación de partículas, los autores comenzaban con la adición de iones calcio y fosfato; sin embargo, los iones minerales ya presentes en el medio provocarían los mismos efectos.

2 Los iones calcio y fosfato se unen entre sí para dar lugar a partículas minerales de fosfato cálcico (hidroxiapatito), de mayor tamaño; sin embargo, determinadas proteínas también se unen al calcio con avidez y se interponen en el proceso de cristalización. En vez de generarse una estructura con el entramado ordenado típico de los cristales puros de hidroxiapatito (*derecha*), las partículas resultantes formadas por minerales y proteínas presentan una estructura molecular amorfa y una forma visible.



3 Conforme las partículas siguen creciendo por la adición de sucesivas capas minerales y proteínicas, pueden también fusionarse para dar lugar a partículas de mayor tamaño que adoptan formas diversas. Además de minerales y proteínas del suero, las partículas incorporan otras moléculas disponibles en el medio de cultivo. Ese material orgánico proporciona un soporte estructural para el crecimiento incesante de las partículas.



3 Al final, se agotan las proteínas del medio y prevalece la cristalización, con lo que se generan sobre la superficie de la partícula prolongaciones aciculares. Posteriormente, esas estructuras cristalinas colapsan para formar husos de mayor tamaño u hojas que parecen aspas de ventilador. A medida que progresa la cristalización, es más difícil distinguir las partículas, que finalmente se fusionan para crear capas minerales de aspecto irregular.

do a formar aborta la ulterior cristalización de los mismos; de ese modo se protege a los tejidos del organismo de una mineralización indeseada. Considerando que todos los fluidos del organismo, incluida la sangre, contienen concentraciones supersaturadas de calcio y fosfato, y que, a pesar de ello, no experimentan una calcificación espontánea, la protección que ejercen dichas proteínas reviste una importancia manifiesta. Sin ellas, los vasos sanguíneos se endurecerían y se generarían formaciones osificadas por doquier.

Mientras seguíamos esa línea de investigación, otro trabajo dirigido por Didier Raoult, de la Escuela de Medicina de Marsella, demostró que la principal proteína detectada en las nanobacterias era la fetuína-A. Posteriormente, nuestros experimentos descubrieron que la fetuína-A era sólo una de las diversas proteínas que integran las nanopartículas de calcio: la albúmina, las proteínas de unión a lípidos (apolipoproteínas), las proteínas del complemento y numerosas proteínas comunes que abundan en la sangre y que se caracterizan por la avidez con que se unen al calcio y al apatito. En esencia, nuestros análisis indicaban que las nanopartículas en desarrollo se limitaban a secuestrar cualquier proteína disponible en su entorno que se uniera al calcio y al apatito.

Demostramos también que los anticuerpos comercializados por el grupo de empresas Nanobac como herramientas de diagnóstico para la detección de nanobacterias reconocían la fetuína-A y la albúmina. Por tanto, los estudios previos basados en el uso de esos anticuerpos para detectar nanobacterias en cultivos de tejidos humanos en realidad habían detectado proteínas comunes de la sangre. Y lo que resultaba más alarmante, los anticuerpos que supuestamente identificaban proteínas exóticas de las nanobacterias en la sangre humana eran específicos de las versiones bovinas de esas proteínas.

Tan extraño descubrimiento se explica por el hecho de que los laboratorios suelen añadir a los medios de cultivo celular suero fetal bovino, ya que constituye una excelente fuente de nutrientes. Sin embargo, en el caso de los cultivos de nanobacterias, el suero también es una fuente importante de las proteínas que se integran en las partículas, de modo que dejan su impronta bovina en las nanoestructuras. Por tanto, los numerosos estudios que afirman haber detectado proteínas de nanobacterias mediante esos anticuerpos son, básicamente, erróneos.

Función en la salud

Aunque se ha demostrado que las nanobacterias corresponden a nanopartículas inertes cristalizadas a partir de minerales comunes y de otros materiales presentes en su entorno, esas entidades nanoscópicas pueden desempeñar una función importante en la salud humana. Creemos que se generan partículas similares a las nanobacterias mediante un proceso natural que, en condiciones normales, protege al organismo frente a cristalizaciones indeseadas y promueve también la formación de nanopartículas en circunstancias determinadas.

Muchos minerales se agregan espontáneos en la naturaleza; pueden incluso mostrar tendencia a cristalizar. El calcio se une ávidamente al carbonato y al fosfato para formar cristales de calcita y de apatito. Por tanto, cualquier molécula con afinidad elevada hacia el calcio o hacia los incipientes cristales de apatito (una proteína, un lípido o cualquier otro componente dotado de carga eléctrica) puede considerarse un inhibidor de la calcificación; en efecto, al unirse a los minerales, interferirá con el proceso de cristalización.

FUNCIONES MINERALES

Los agregados de partículas con aspecto de nanobacterias guardan semejanza con los depósitos calcificados que se observan en los tejidos humanos. Ambos se originan a partir de las interacciones entre minerales y proteínas, responsables de la mineralización de dientes y huesos, así como de la inhibición de calcificaciones indeseadas. Con frecuencia, las calcificaciones tisulares anormales son síntoma, no causa, de enfermedad; sin embargo, cuando crecen demasiado, pueden dar lugar a cálculos renales y otras patologías.

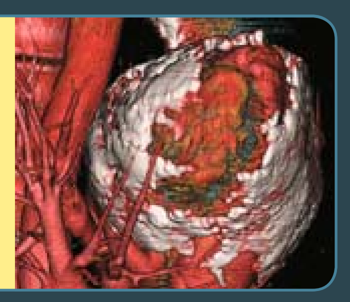


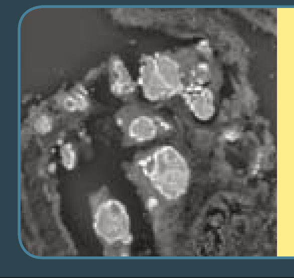
MINERALIZACION NORMAL

Para la formación del hueso es preciso que esferas de hidroxiapatito de 10 nanómetros de diámetro se fusionen y originen filamentos donde las bolitas de mineral se encuentran diseminadas entre las fibras de colágeno. Esas piezas de construcción constituidas por hidroxiapatito se unen entre sí de manera gradual para generar primero fibras y, posteriormente, mantos mineralizados que envuelven el soporte de colágeno; ello confiere al hueso resistencia a la tensión.

CORAZONES ENDURECIDOS

Los depósitos calcificados (*blanco*) del corazón y de las arterias se forman mediante los mismos mecanismos de mineralización que el hueso; constituyen un síntoma de trastorno cardiovascular. Se cree que las calcificaciones constituyen una respuesta a una lesión tisular; si se trata la enfermedad que las causa, es posible detenerlas o hacer que remitan.

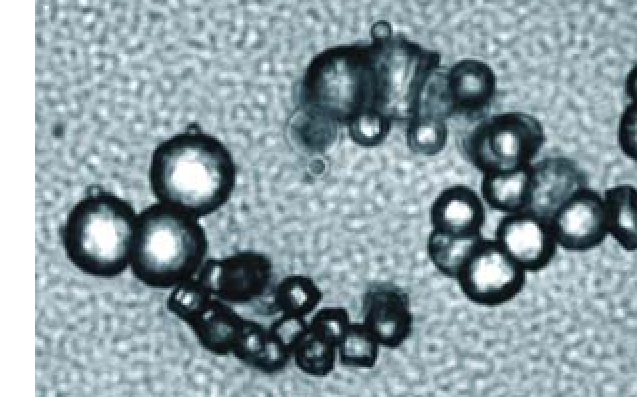




¿CAUSA O EFECTO?

En otras partes del organismo pueden observarse diminutas calcificaciones, como en esta muestra de tejido inocuo procedente de una tiroides humana afectada por un cáncer. Las estructuras de calcio y fosfato pueden ser reflejo de un fallo en los mecanismos de eliminación de minerales en el tejido enfermo. Otra teoría, todavía sin confirmar, propone que las mineralizaciones se originan a partir de sustancias contaminantes u otras partículas foráneas.

MEDICAL BODY SCANS *Photo Researchers, Inc.* (*hueso*); OLIVIER VOISIN *Photo Researchers, Inc.* (*corazón*); CORTESIA DE ANTONIETTA M. GATTI *Universidad de Modena y Reggio Emilia* Y STEFANO MONTANARI *Nanodiagnostics Srl*



3. LOS CRISTALES PUROS de carbonato cálcico adoptan formas diversas. Comprender la generación natural de las nanopartículas y la repercusión de éstas sobre la salud humana ayudará a controlar las propiedades de las nanopartículas artificiales.

CORTESIA DE JOHN D. YOUNG Y JAN MARTEL

En el interior del organismo, la unión de calcio o de cristales incipientes a proteínas puede constituir una señal para que esos complejos se almacenen o se desechen.

Tal constante retirada de la circulación de los minerales evita depósitos anormales de calcio que pudiesen causar enfermedades. Sin embargo, se necesitan cada vez más proteínas para unirse a los minerales; si los minerales llegan a superar en número a las proteínas inhibidoras, el mecanismo de inhibición puede verse desbordado. Cuando los minerales saturan los lugares de unión de las proteínas, los complejos mineral-proteína pueden, a su vez, convertirse en núcleos de cristalización, con lo que se inicia un proceso alternativo que puede dar lugar no sólo al fenómeno de las nanobacterias, sino también a calcificaciones anómalas, como la formación de cálculos y la calcificación de las arterias.

En cuanto a su posible patogenicidad, esas nanopartículas deben considerarse, en primer lugar, integrantes de un ciclo más amplio de regulación del calcio. Los mecanismos de formación de complejos entre minerales y proteínas aquí descritos intervienen también en la osteogénesis. Por tanto, en lugar de ser la causa de enfermedades relacionadas con una calcificación anormal, los depósitos calcificados quizá sean el producto final de otras anomalías metabólicas que afectan a la inhibición y a la eliminación de los minerales.

Es demasiado pronto para saber si esos conocimientos llegarán a convertirse en estrategias terapéuticas. Sin embargo, el concepto de inhibición/nucleación probablemente explica la totalidad de las observaciones previas en torno a las nanobacterias. Por ejemplo, al aumentar de tamaño mediante procesos de fusión, esas esferas de minerales y proteínas evolucionan; se unen entre sí para formar husos y, en última instancia, películas.

Hoy sabemos que los cambios morfológicos aludidos se deben a una sencilla interacción entre proteínas y minerales, en la que sale ganando la mineralización. Según nuestra hipótesis, las partículas con aspecto de nanobacterias surgen en las placas de cultivo debido a la ausencia de los mecanismos dinámicos de eliminación de minerales que operan en el organismo. En la actualidad, las nanobacterias descritas en cultivos celulares pueden considerarse simples productos secundarios del metabolismo normal del calcio operando en condiciones estáticas.

Todas las partículas de nanobacterias que logramos ensamblar, a partir de la sangre y de otros fluidos del organismo, revelaron una composición química sencilla y predecible, que refleja la naturaleza de los materiales de construcción disponibles en el medio circundante. Si modificamos la composición del medio, se altera la constitución de las nanopartículas; ello nos permite crear partículas con aspecto de nanobacteria con cualquier composición prescrita.

Aprovechando ese proceso, hemos producido una familia entera de complejos iónicos biológicamente emparentados y con estructura similar; los llamamos biones. Los biones pueden adquirir cualquier tamaño y forma. Imitan formas biológicas que parecen estar dotadas de vida. Además de demostrar la naturaleza inerte de las nanopartículas, los biones ayudarán a comprender el modo en que se fabrican y ensamblan en la naturaleza los materiales de construcción constituidos por piezas nanoscópicas.

Comprender la generación natural de esas partículas tan diminutas, constituidas por minerales que forman complejos con moléculas orgánicas, puede aportar algo de luz sobre el origen de la vida en la Tierra hace miles de millones de años. A través de un proceso de autorreplicación similar al crecimiento de las nanopartículas, cabe suponer que los minerales que estaban formando complejos con pequeñas moléculas orgánicas constituirían los primeros materiales de construcción de la vida y encontrarían la manera de autoperpetuarse. Ese tipo de complejos minerales y orgánicos podrían haber dado cobijo y compartimentado los primeros procesos relacionados con la vida; quizá podrían haberse convertido en los auténticos centros catalíticos necesarios para iniciar los procesos vitales. Se trata de una posibilidad apasionante, que estamos explorando en la actualidad.

Que esta gama tan amplia de calcificaciones observada en la naturaleza y en tantas enfermedades crónicas pueda por fin comprenderse en un contexto dominado por las interacciones moleculares entre proteínas, lípidos, minerales y otros factores discretos no deja de ofrecer un panorama excitante. A diferencia de la hipótesis de las nanobacterias defendida antaño, el conocimiento actual sobre la composición y el origen de tales partículas minerales y orgánicas permitirá avanzar en la comprensión del modo en que resultaron convenientes para la vida, pese a su carácter inerte.



Bibliografía complementaria

NANOBACTERIA: AN ALTERNATIVE MECHANISM FOR PATHOGENIC INTRA- AND EXTRACELLULAR CALCIFICATION AND STONE FORMATION. E. Olavi Kajander y Neva Çiftçioğlu en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n.º 14, págs. 8274-8279; 7 de julio de 1998.

PURPORTED NANOBACTERIA IN HUMAN BLOOD AS CALCIUM CARBONATE NANOPARTICLES. Jan Martel y John Ding-E Young en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 14, págs. 5549-5554; 8 de abril de 2008.

PUTATIVE NANOBACTERIA REPRESENT PHYSIOLOGICAL REMNANTS AND CULTURE BY-PRODUCTS OF NORMAL CALCIUM HOMEOSTASIS. John D. Young y col. en *PLoS ONE*, vol. 4, n.º 2, pág. e4417; 9 de febrero de 2009.

CHARACTERIZATION OF GRANULATIONS OF CALCIUM AND APATITE IN SERUM AS PLEOMORPHIC MINERALO-PROTEIN COMPLEXES AND AS PRECURSORS OF PUTATIVE NANOBACTERIA. John D. Young y col. en *PLoS ONE*, vol. 4, n.º 5, pág. e5421; 1 de mayo de 2009.

El ORIGEN VIOLENTO

Se propone que los impactos de asteroides en los años de juventud del planeta gestaron los elementos componentes de las masas continentales. ¿Es cierta tal hipótesis?

Sarah Simpson

CONCEPTOS BASICOS

- Colisiones de asteroides golpearon la Tierra al principio de su historia en mayor medida de lo que se creía.
- Nuevos datos revelan que las nueve mayores colisiones ocurrieron hace entre 3800 millones y 2500 millones de años de antigüedad, el eón durante el cual se formaron los primeros continentes del planeta.
- Una nueva y audaz hipótesis sugiere que estas rocas espaciales no fueron totalmente destructivas; contribuyeron a desencadenar la formación de los continentes.

de los CONTINENTES



Un magma turbulento, incandescente, e hirvientes gases cubrían la Tierra en su despertar de hace 4600 millones de años. Con el tiempo, algunas regiones de ese mar encendido se enfriaron lo suficiente para endurecerse, originando las primeras rocas del planeta flotando como la escoria en un líquido incandescente. Sin embargo, éstas no constituían nada más que una delgada película. Las gruesas raíces de la tierra firme tardaron mucho más en formarse.

Cómo y a qué velocidad surgieron y crecieron los continentes es materia de un vivo debate. La tradición científica ha mantenido durante mucho tiempo que sólo la dinámica interna de la Tierra ha determinado la formación de los continentes.

Sin embargo, hallazgos recientes han desviado la atención hacia una idea en otro tiempo considerada herética: los grandes impactos de asteroides desempeñaron también un papel constructor importante.

La asunción básica era que los bombardeos de asteroides, tan frecuentes durante la infancia de la Tierra, se acabaron hace aproximadamente 3800 millones de años. Por entonces, el planeta se había enfriado lo suficiente como para que los océanos nacientes albergaran ya vida microscópica. Los mayores impactos acontecidos desde entonces se consideraban excepcionales y totalmente destructivos (recuérdese la extinción de los dinosaurios).

Recientemente, sin embargo, la ciencia se ha visto obligada a pelear con el descubrimiento de una inesperada serie de explosiones masivas entre hace aproximadamente 3800 millones y 2500 millones de años, un lapso de tiempo en la juventud de la Tierra conocido como eón Arcaico. La reputación de los asteroides como arrasadores de la corteza parece contradecirse con la peculiaridad del Arcaico: fue el período más productivo, en lo que a formación de continentes se refiere, de toda la historia de la Tierra. Según algunas estimaciones, el 65 por ciento de la corteza continental actual se formó durante ese tiempo.

Para intentar resolver esta aparente paradoja, los geólogos están repasando los registros de rocas antiguas buscando pistas de cómo colisiones tan colosales conformaron el planeta. Andrew Y. Glikson, de la Universidad Nacional Australiana en Canberra, está convencido por 40 años de trabajo de campo que los impactos extraterrestres contribuyeron al crecimiento de los primeros continentes del planeta, incluidos los que se preservan, con vestigios, de Sudáfrica y Australia Occidental.

Muchos científicos consideran la aseveración de Glikson una apreciación prematura; aducen que los indicios directos de lo ocurrido en la antigüedad de la Tierra son muy escasos y controvertidos. A pesar de ello, las simulaciones por ordenador de los efectos potenciales de grandes impactos parecen corroborar su hipótesis. Posiblemente, es demasiado pronto para revisar la interpretación clásica de la evolución de los primeros continentes, pero hasta los más escépticos están de acuerdo en que ya es hora de abordar los efectos causados por esas poderosas fuerzas del espacio en nuestro planeta.

¡Tierra!

Los científicos llevaban decenios en su esfuerzo por descifrar el origen de los continentes antes de que la influencia de los impactos asteroides durante el Arcaico apareciera en escena. Los intentos han sido siempre difíciles porque la creación de un continente es un proceso muy complicado; requiere construir un fragmento de corteza tan grueso y con la propiedad de flotar, que no pueda nunca hundirse hacia el ardiente interior de la Tierra. Ambas características son las que hacen a los actuales continentes tan distintos de la litosfera subyacente en los océanos. Relativamente delgada y densa, la corteza oceánica, rica en hierro, se hunde con facilidad, en su mayor parte tan sólo 200 millones de años después de su formación.

Por otro lado, la litosfera continental está constituida por rocas de menor densidad como el granito, lo que ha mantenido fragmentos muy antiguos a flote, de igual modo que los icebergs en el mar, durante casi 4 mil millones de años.

La historia de los primeros continentes difiere de un manual a otro, aunque comparten una misma explicación que se desarrolla de la siguiente forma:

Durante las breves interrupciones del bombardeo de asteroides que siguió al nacimiento del planeta, la tendencia natural a enfriarse de la Tierra provocó la formación repetida de corteza terrestre. No era una corteza perfectamente continua; consistía en varias docenas de fragmentos que se deslizaban sobre un magma en agitación permanente. Al igual que la cera caliente ascendiendo en una lámpara de lava, las plumas de rocas fundidas del manto ascendían, se enfriaban parcialmente a medida que se movían por la superficie, para hundirse después, arrastrando con ellos los fragmentos originales, ultradensos de corteza. Mientras tanto, los volcanes expulsaban gases procedentes del interior de la Tierra y creaban la atmósfera primitiva, la lluvia se condensaba y se formaban océanos someros sobre la delgada capa de magma enfriado que constituía la corteza.

La historia continúa. Se formó el embrión de un continente, cuando el calor procedente de una pluma en ascenso fundió parcialmente una parte de la densa corteza antes de que ésta se hundiera de nuevo en el manto, lo que permitió la separación del magma en uno de los minerales más ligeros, de menor punto de fusión. De mayor flotabilidad que la roca circundante, el magma nuevo tendía a subir; una vez solidificado, la roca resultante era más ligera y con menor tendencia a hundirse.

DON DIXON

Formación de los continentes

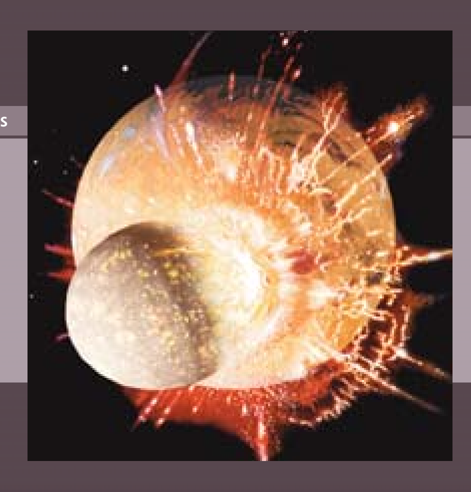
Hace 4600 millones de años

OCEANO DE MAGMA INCANDESCENTE
La Tierra se condensa a partir de los restos arremolinados en la nebulosa solar. Es una bola de agitado magma y gases en ebullición.



Hace 4500 millones de años

INTENSO BOMBARDEO
El planeta se solidifica a medida que pierde calor. Sin embargo, impactos de grandes asteroides, alguno de la magnitud de Marte, destruyó casi toda la incipiente corteza.



Ciclos repetidos de fusión parcial y separación de magma más ligero produjeron, con el tiempo, granito. Es imposible conocer la cronología precisa del proceso. Sin embargo, al menos perduran indicios de los primeros 160 millones de años de la infancia de la Tierra: minúsculos cristales de circón de 4400 millones de años de antigüedad, erosionados de un granito primigenio y depositados en formaciones de rocas sedimentarias más jóvenes en lo que ahora es Australia [*véase* "Una Tierra primigenia fría", de John W. Valley; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 2005].

Estos indicios de granito primitivo constituían, probablemente, un componente menor de las primeras masas de roca, que adquirieron grosor suficiente para emerger sobre los primeros océanos. Tales masas continentales diferirían, a buen seguro, de las actuales, que cubren el 30 por ciento de la superficie del planeta y presentan un grosor medio de 35 kilómetros. Los primeros protocontinentes fueron ganando altura de una manera paulatina, como la ganan hoy los continentes: colisiones entre ellos suturaron y engrosaron la corteza formando masas mayores; las plumas de manto desencadenaron grandes flujos de magma desde el interior.

Coinciden la mayoría de los geólogos en que, hace unos 3000 millones de años, la Tierra tuvo su primer continente conocido: una inhóspita montaña de roca de origen volcánico de extensión algo menor que la actual Australia. Cabe incluso la posibilidad de que los núcleos antiguos de los continentes, o cratones, de Australia y Africa formaran parte del continente original. El cratón de Pilbara en Australia Occidental y las montañas de Barberton, en el cratón de Kaapvaal de Sudáfrica "son, de forma asombrosa, muy similares geológicamente", apunta Bruce M. Simonson, del Colegio Universitario Oberlin, quien durante meses ha explorado los afloramientos secos y erosionados de las laderas de ambas regiones. Afirma: "Soy un firme defensor de que Barberton y Pilbara son un único continente que se partió en dos".

Se desconoce dónde se encontraba el primer continente del globo. No obstante, a medida que el ardiente interior de la Tierra continuaba agitado, la masa continental se separó y emergieron otras. Se sucedió una serie de rupturas y suturas de los continentes, bien documentadas, que dieron lugar a la distribución actual.

Saber dónde mirar

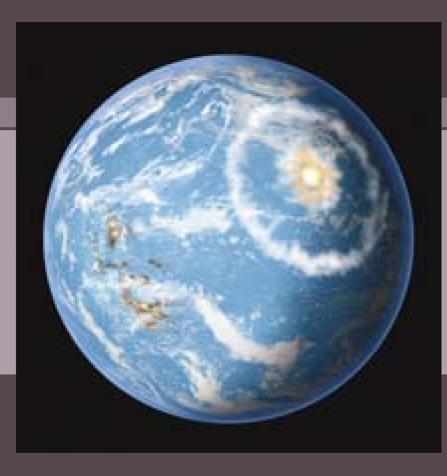
El baile de las placas litosféricas explica la transición de los continentes desde la juventud hacia la madurez. Lo que sucedió antes se encuentra, sin embargo, en el territorio de la incertidumbre. Por esa razón, los geólogos recurren a las antiguas formas de Sudáfrica y Australia para encontrar pistas sobre el nacimiento de los continentes. En comparación con los cratones más modernos de otros continentes, los de Kaapvaal y Pilbara han sufrido menos metamorfismo y en ellos perduran algunos de los indicios mejor conservados de la corteza del Arcaico. De especial interés en dichos cratones resultan los cinturones de piedra verde ("greenstone belts"), formaciones de roca que se constituyeron hace entre 3500 millones y 2400 millones de años, en el momento en el que se originaron los primeros continentes.

Desde los años setenta, la mayoría de los geólogos han interpretado esos cinturones como análogos antiguos de los arcos de islas volcánicas que se distribuyen a lo largo de los márgenes donde se solapan placas litosféricas en colisión y que, andando el tiempo, formarán parte de la masa continental. La colisión de las placas perdura durante millones de años. La placa inferior se sumerge en el abrasante interior de la Tierra cada vez a mayor profundidad, creando una profunda fosa, la zona de subducción. En tanto que las islas viajan con la placa que subduce hasta la fosa, esas partes más gruesas se incrustan en el continente y quedan sometidas a una poderosa fricción, en vez de ser arrastradas hacia el interior junto con la corteza de la que provienen. A Norteamérica se incorporaron así Sierra Nevada y otras cadenas montañosas del oeste de los Estados Unidos.

Sin embargo, tal y como afirma Glikson, este mecanismo moderno de crecimiento de las masas continentales no puede dar respuesta a todas las características geológicas observadas en los cinturones de piedra verde. Durante sus estudios detallados de los cinturones de Sudáfrica y Australia, se encontró con que los segmentos más antiguos de los cinturones —los que poseían de 3000 a 3500 millones de años de antigüedad— parecían tener acumulaciones verticales, como si el material erosionado se hubiera depositado en capas, entre domos de granito y empujando de abajo a arriba. Tales formaciones no presentaban indicios de subducción; a saber, materiales

Hace 3200 millones de años

INCIPIENTES MASAS CONTINENTALES
La fusión parcial y la amalgama de fragmentos continentales aún más antiguos produjeron el primer continente. Los grandes impactos siguen ocurriendo, aunque con una frecuencia menor.



Hace 1100 millones de años

EL PRIMER SUPERCONTINENTE
Las colisiones entre fragmentos continentales fusionaron las iniciales masas continentales con el primer supercontinente conocido, Rodinia.



sedimentarios y volcánicos acumulados horizontalmente al tiempo que colisionaban dos fragmentos de la corteza.

No debe sorprendernos la falta de huellas de subducción. La mayoría de los investigadores están de acuerdo en que la tectónica de placas fue, probablemente, menos eficiente al principio del Arcaico, si es que operaba. Por entonces, el planeta era mucho más caliente; en consecuencia, la convección (al estilo de una lámpara de lava) que dirige el movimiento de las placas era mucho menos vigorosa. Aun así, según Glikson, algo rápido tuvo que echar una mano en la formación de las partes más antiguas de los cinturones arcaicos. Las edades concretas de varias rocas halladas en ellas sugieren que se dieron grandes cuerpos de granito en una serie de episodios abruptos y bien definidos. Si la subducción no era la fuerza que los provocaba, ¿qué era?

Tales objeciones llevaron a Glikson a buscar nuevas explicaciones de lo que configuró la Tierra durante el Arcaico. Sabía que un factor que la mayoría de los geólogos habían ignorado era el efecto potencial de los impactos de asteroides y cometas. El bombardeo de asteroides alcanzó su punto álgido hace unos 3900 millones de años aproximadamente, aunque algunas investigaciones sobre los cráteres lunares indican que los grandes impactos persistieron hasta hace unos 3200 millones de años. Esos últimos bombardeos, ¿podrían tener algo que ver? El primer paso para encontrar la respuesta sería hallar sólidas pruebas de esos impactos también en la Tierra. ¿Habían sido borradas las pruebas o los geólogos las contemplaban sin percatarse de las mismas?

Grandes impactos

En 1986 dos geólogos norteamericanos respondieron a esta pregunta. Durante sus campañas anuales en el cinturón de piedra verde de las montañas Barberton, Donald R. Lowe, de la Universidad de Stanford, y Gary R. Byerly, de la Universidad estatal de Louisiana, se tropezaron con una fina capa de antiguo sedimento oceánico que contenía centenares de cuentas de vidrio huecas. En una observación más detallada, las esferas del tamaño de un grano de arena parecían casi idénticas a las esférulas de impacto que se convirtieron en las pruebas más claras del choque de un asteroide contra la Tierra hace 65 millones de años y que acabó con el reinado de los dinosaurios. Las esférulas de Barberton, de una antigüedad de 3200 millones de años —y otro lecho de esférulas hallado en el cratón de Pilbara—, se convirtieron en la primera prueba consistente de la colisión de grandes cuerpos extraterrestres contra la Tierra durante el eón Arcaico.

Les siguieron otros descubrimientos. Sabido que la capa de esférulas originada con el impacto que provocó la desaparición de los dinosaurios se extiende por todo el globo, Lowe y Byerly establecieron presto una correlación entre el lecho australiano y el impacto de hace 3500 millones de años que identificaron en Sudáfrica. Allí también descubrieron dos lechos más de esférulas de 3200 millones de años de antigüedad. Por otro lado, a principios de los noventa, Simonson había dado con inesperados lechos de esférulas durante sus exploraciones de las formaciones de hierro de la región de Pilbara, lo que alargaba la asombrosa serie de impactos de asteroides hasta más allá del final del eón Arcaico, hace 2500 millones de años.

La exploración de las zonas de piedra verde arcaicos, entendidos en el marco de esos impactos, les ofrecía nuevas perspectivas sobre los asteroides y sus efectos. A partir de la composición rica en magnesio y hierro de las esférulas, Lowe y Byerly dedujeron que la mayoría de las rocas errantes del espacio chocaron contra las densas rocas de una cuenca oceánica, probablemente a la distancia justa de las regiones en las que se hallan las esférulas bien preservadas. Las huellas de tsunamis de alcance global que acompañan a cada uno de los lechos descubiertos en Sudáfrica corroboran que los asteroides impactaron en un océano y no en tierra firme.

Glikson propone que la cronología de algunos impactos coincide con la formación de "un gran depósito de cantos angulosos, algunos de más de 250 metros de ancho", en la región de Pilbara. Tales bloques son el ruinoso resultado del ascenso y la subsidencia de la superficie terrestre a lo largo de las grandes fallas sísmicas de la región. De hecho, una serie de terremotos violentos constituiría uno de los efectos más inmediatos de un gran impacto de asteroide.

Parece evidente que los impactos de principios del Arcaico afectaron con fuerza al planeta. Lowe y Byerly estimaron que los asteroides eran grandes: de entre 20 y 25 kilómetros de diámetro, datos obtenidos a partir de la distribución de las esférulas y de comparaciones con las eyecciones de impactos posteriores (según algunas estimaciones, el asteroide que provocó la desaparición de los dinosaurios no tenía más de 15 kilómetros de extensión). Los datos sobre el tamaño de los asteroides reforzaban la noción de Glikson acerca de que podrían haber desempeñado alguna función en la formación continental. Pronto centró su atención sobre otros cambios bruscos en el registro geológico en los tiempos en los que él observa un particular trío de impactos: los que Lowe y Byerly hallaron en los sedimentos surafricanos depositados hace unos 3200 millones de años.

En un artículo técnico reciente, Glikson observa que la cronología de esos impactos coincide con las señales más importantes de cuando esas regiones emergieron por primera vez por encima del nivel del mar, se supone que formando una nueva masa continental. Concretamente, el registro geológico previo a los impactos consiste en gruesas capas de corteza oceánica y algunos tipos de sedimentos propios del fondo marino. En su opinión, durante el período que abarca las colisiones de asteroides, las capas basálticas se deformaron, levantaron y erosionaron, alteraciones atribuibles a la colisión con asteroides.

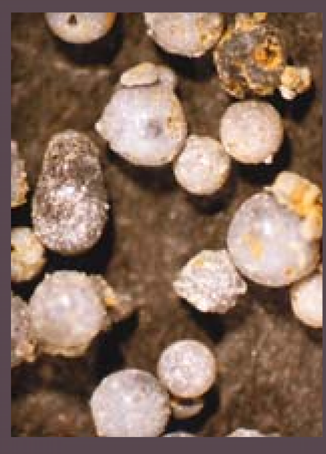
En cambio, las rocas formadas después del lapso de tiempo del trío de impactos son reliquias erosionadas de rocas que sólo se podrían haber generado en tierra firme. Estas diferencias sugieren que, poco después de la colisión de los asteroides, grandes fuerzas provenientes del interior de la Tierra levantaron la corteza por encima de la superficie del océano, se formaron granitos y otros tipos de rocas continentales, y que finalmente fueron erosionadas. Glikson sugiere, además, que los propios impactos con los asteroides son el origen de las alteraciones descritas.

Mayor relevancia ocupa en la argumentación de Glikson otro punto: las grandes masas de granito de las regiones de Pilbara y Kaapvaal, intrusiones que se dieron hace unos 3200 millones de años. La similitud de la cronología de las colisiones de asteroides y la de la formación de nuevo magma, prosigue, fue más que una mera coincidencia; eran causa

BRUCE M. SIMONSON *Oberlin College (esférulas)*; SCOTT HASSLER *Oberlin College (Región de Pilabara)*; DON LOWE *Universidad de Stanford (montañas de Barberton)*; CAT WILSON *(mapas)*

Impactos repetidos en un antiguo continente

Las viejas formas en Sudáfrica y Australia ayudarán a explicar el nacimiento de un continente. Algunos geólogos afirman que partes de las montañas de Barberton en Sudáfrica (*arriba a la derecha*) y de la región de Pilbara, al noroeste de Australia (*abajo*), son vestigios de la misma masa continental inicial. Para las dataciones, los geólogos que trabajan en esas áreas han descubierto indicios de al menos nueve grandes impactos de asteroides, acontecidos entre hace 3500 millones y 2500 millones de años, cada uno consistente en una capa de esférulas de impacto (*arriba a la izquierda*).



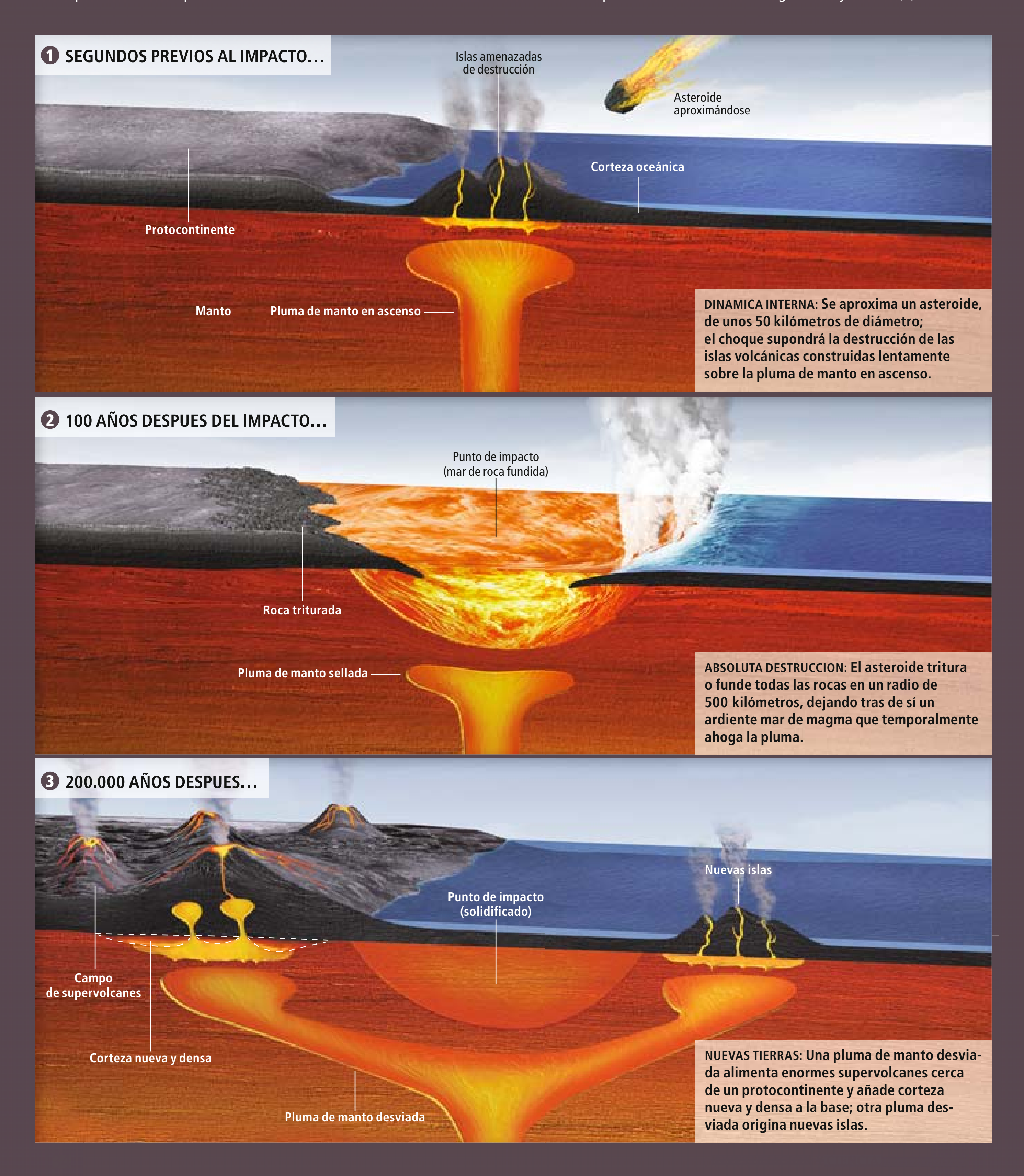
▲ Esferas del tamaño de un grano de arena, llamadas esférulas de impacto, se condensaron de una nube de roca caliente y vaporizada, levantada durante la colisión de la Tierra con un asteroide hace 2500 millones de años. El viento dispersó el vapor de esa roca por todo el planeta y, a medida que se enfriaba, se condensaba en forma de gotitas que solidificaban y caían sobre la Tierra; quedaban atrapadas en capas de sedimentos del antiguo fondo marino y ahora afloran en la superficie continental al noroeste de Australia.



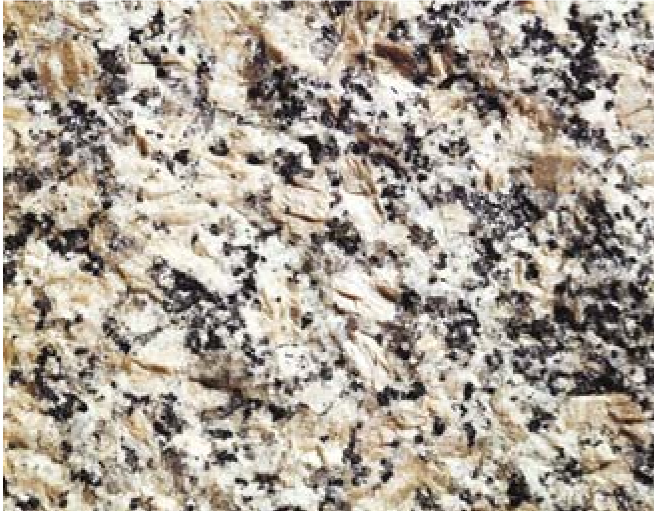


Así emerge el continente a partir del caos cósmico

Hace miles de millones de años, la dinámica interna de la Tierra producía masas continentales sobre plumas de manto en ascenso, tal y como lo hace en la actualidad: el material caliente y flotante fundió parcialmente la roca suprayacente y, de este modo, creando volcanes que engrosaron la corteza (*1*). Una gran colisión con un asteroide habría contenido temporalmente este proceso (*2*). Sin embargo, las simulaciones por ordenador sugieren que, a pesar del impacto, la colisión podría haber tenido efectos constructivos mediante el desvío de la pluma de manto hacia las regiones adyacentes (*3*).







y efecto. Asegura que sus fuerzas de alcance global "provocaron los mayores ascensos de los continentes primigenios y las mayores intrusiones de magmas graníticos, pruebas del violento origen de algunas partes de la corteza continental, cuando menos".

A la pregunta crucial ¿qué proceso de calentamiento generó el magma? Glikson responde: la fuerza de distorsión de los impactos de asteroides de hace 3200 millones de años modificó la convección del manto, provocando nuevas plumas de manto que elevaron y calentaron la corteza desde el interior.

Crítica constructiva

La credibilidad del argumento de Glikson gira en torno al tamaño del asteroide errante. Simonson sugiere que, desde la perspectiva de la dinámica interna de la Tierra, una roca del tamaño del asteroide que provocó la desaparición de los dinosaurios sería como un "insecto en el parabrisas". Ahora bien, si los impactos de principios del Arcaico doblaban de largo ese tamaño, podrían haber afectado mucho más al planeta. Concretamente, los impactos de asteroides de más de 50 kilómetros de diámetro podrían haber modificado los flujos de calor en el interior de la Tierra; así lo cree Jay Melosh, de la Universidad de Purdue. A partir de simulaciones por ordenador de hipotéticos impactos que él y sus colegas desarrollaron con otros propósitos, Melosh describe cuál sería el tamaño necesario de un asteroide arcaico para que el impacto pudiera contribuir al crecimiento de un continente.

En el cuadro de su hipótesis, Melosh da por supuesto que un asteroide de 50 kilómetros de diámetro choca contra una cuenca oceánica a 20 kilómetros por segundo. Un impacto como éste no excava un cráter, sino que genera un enorme mar de roca fundida de 500 kilómetros de extensión. Si un lago de magma inducido por un asteroide se formara sobre una pluma de manto, su calor intenso contendría la pluma ascendente y se desviaría hacia las regiones adyacentes. Una pluma de manto desviada bajo la corteza oceánica puede generar nuevas islas que mucho después pueden alcanzar una zona de subducción y engrosar un continente en crecimiento. O bien, si la pluma de manto es desviada hasta debajo de un protocontinente constituido por rocas menos densas, la nueva fuente de calor sería suficiente para producir ascensos de magma granítico como el que se encuentra en los cinturones de piedra verde de Pilbara y Kaapvaal, para así engrosar el continente desde abajo.

Sin embargo, Malosh advierte que semejante escenario plantea muchas incógnitas. Probar que determinado asteroide desvió plumas de manto para crear el embrión de un continente específico a partir de indicios en el registro geológico resulta casi imposible. Los cráteres que generaron los asteroides desaparecieron por subducción o erosión, hace ya mucho tiempo. Por otro lado, aunque una pluma fuera realmente responsable de la producción de granito, ¿quién dice que no ascendía bajo el protocontinente antes del impacto del asteroide?

Al final, Glikson ha revelado una sorprendente coincidencia en el tiempo entre los impactos de asteroides a principios del Arcaico y la intrusión de nuevo magma en antiguos fragmentos de continentes actuales, y los ha relacionado con un mecanismo creíble por el que un impacto cósmico podría determinar la producción del nuevo magma. Love sentencia: "Es una hipótesis plausible de lo que habría ocurrido, aunque sólo se trate de una interpretación". Sin duda, los impactos de alcance planetario interrumpieron la dinámica interna de la Tierra. Su violencia podría no haber sido totalmente destructiva.

DENSIDAD DE LA MATERIA: El basalto (*izquierda*) es el principal tipo de roca que conforma las cuencas oceánicas. El granito, menos denso (*derecha*), es el componente básico de los continentes. Su flotabilidad permite que no se hundan los continentes, mientras que el fondo oceánico se hunde hacia el caliente interior de la Tierra.

KEVIN HAND (*ilustración de la página opuesta*), FUENTE: JAY MELOSH *Universidad de Purdue*; PETER SCOONES *Getty Images* (*basalto*); ERICH SCHREMPP *Photo Researchers, Inc.* (*granito*)

Bibliografía complementaria

EVOLUCION DE LA CORTEZA CONTINENTAL. S. Ross Taylor y Scott M. McLennan en *Investigación y Ciencia*, páginas 56-62; marzo de 1996.

FIELD EVIDENCE OF EROS-SCALE ASTEROIDS AND IMPACT FORCING OF PRECAMBRIAN GEODYNAMIC EPISODES, KAAPVAAL (SOUTH AFRICA) AND PILBARA (WESTERN AUSTRALIA) CRATONS. Andrew Y. Glikson en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 267, págs. 558-570; 2008.

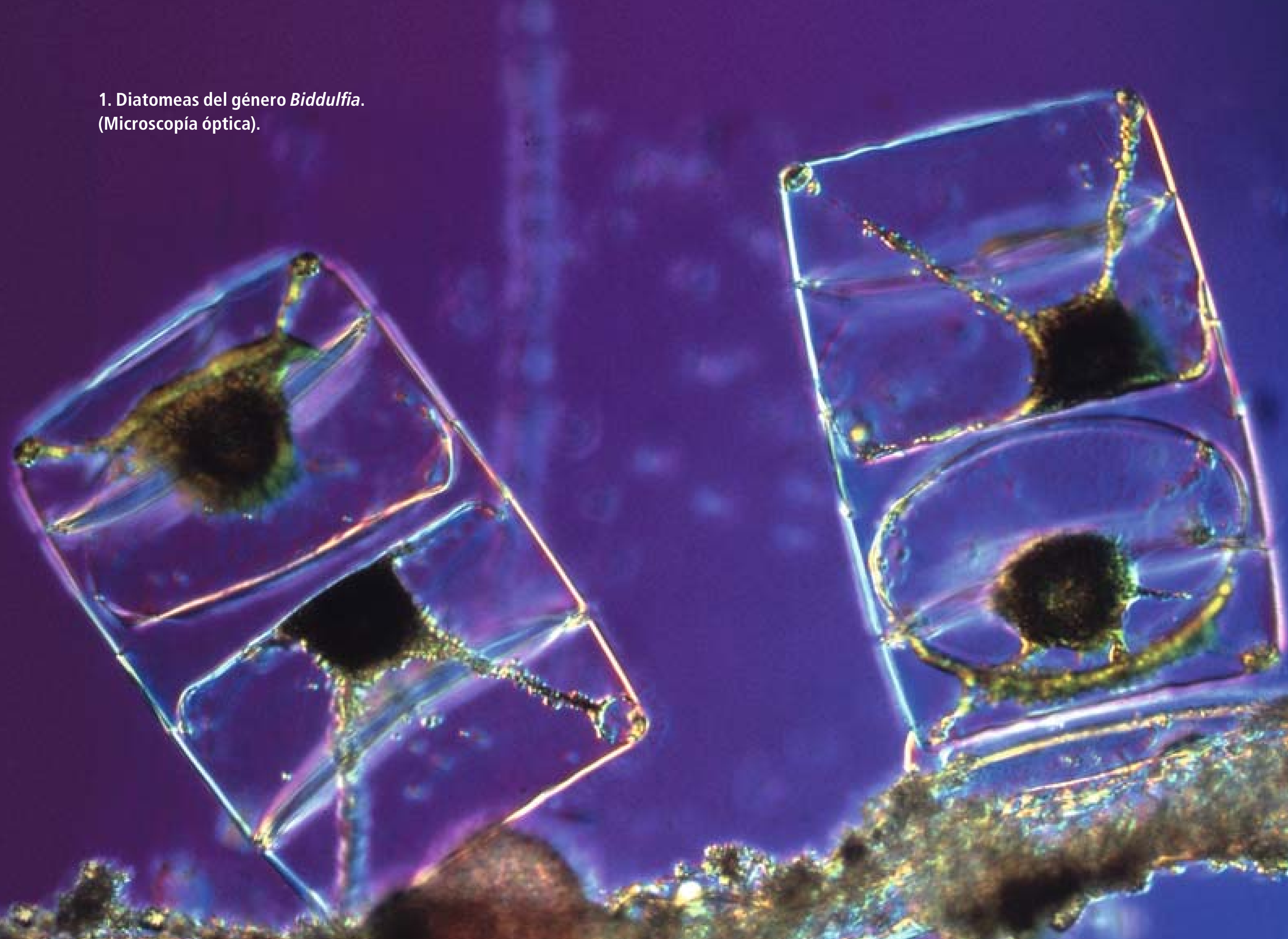
Arquitectura de las diatomeas

Alícia Duró y José García Valero

Las diatomeas, algas fitoplanctónicas de distribución cosmopolita, se caracterizan por poseer una pared celular de naturaleza silícea, altamente estructurada. La especificidad que muestran los patrones morfológicos de dicha cubierta externa ha constituido la base para la identificación de estos organismos unicelulares. Sin embargo, la formación de la pared se ha estudiado sólo en algunas especies, como las del género *Coscinodiscus*. Pertenecen al grupo de las diatomeas centrales, que presentan una simetría radial.

La cubierta silícea de las diatomeas, o frústulo, consta de dos piezas encajantes: la epiteca y la hipoteca. La sílice necesaria para la construcción del frústulo se obtiene del medio en forma de ácido ortosilícico. Se almacena en el interior de la célula transformada en sílice amorfa hidratada (ópalo); las vesículas la depositan luego en la pared celular. En el caso de las diatomeas con simetría radial, el depósito silíceo se inicia en una zona central, crece de forma centrífuga y genera unas costillas a modo de radios. A continuación, se tienden puentes laterales, organizándose un conjunto en red.

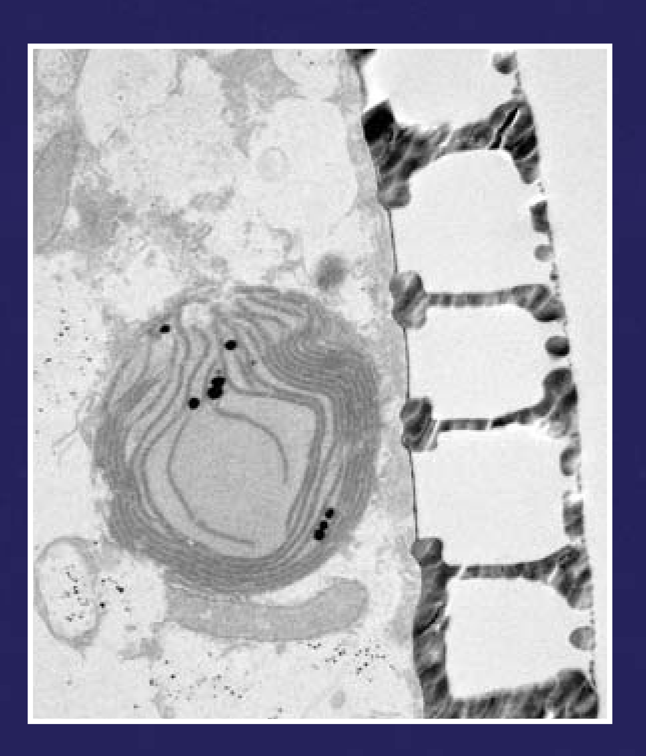
A partir de ese patrón básico, se crean estructuras de gran complejidad, que resultan en una amplia diversidad de formas ornamentales características de las paredes apicales de las tecas, o valvas. El microscopio electrónico ha resultado decisivo para ahondar en la ornamentación y organización estructural de la pared de las diatomeas.



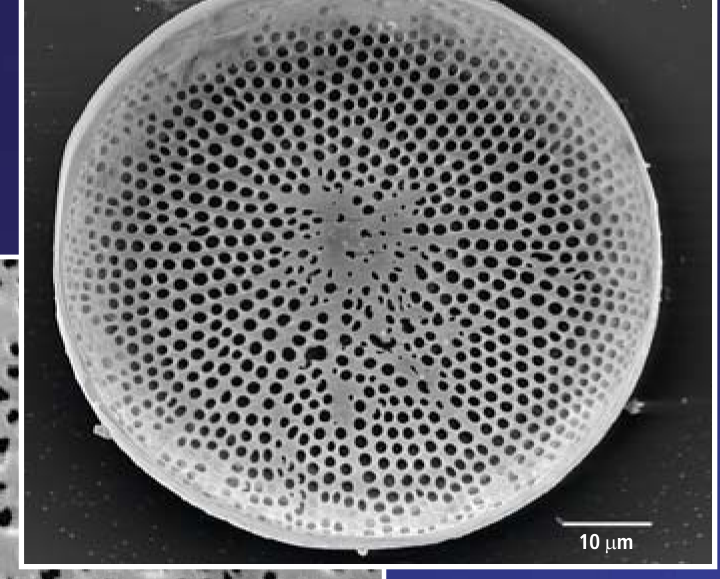
1. Diatomeas del género *Biddulfia*. (Microscopía óptica).

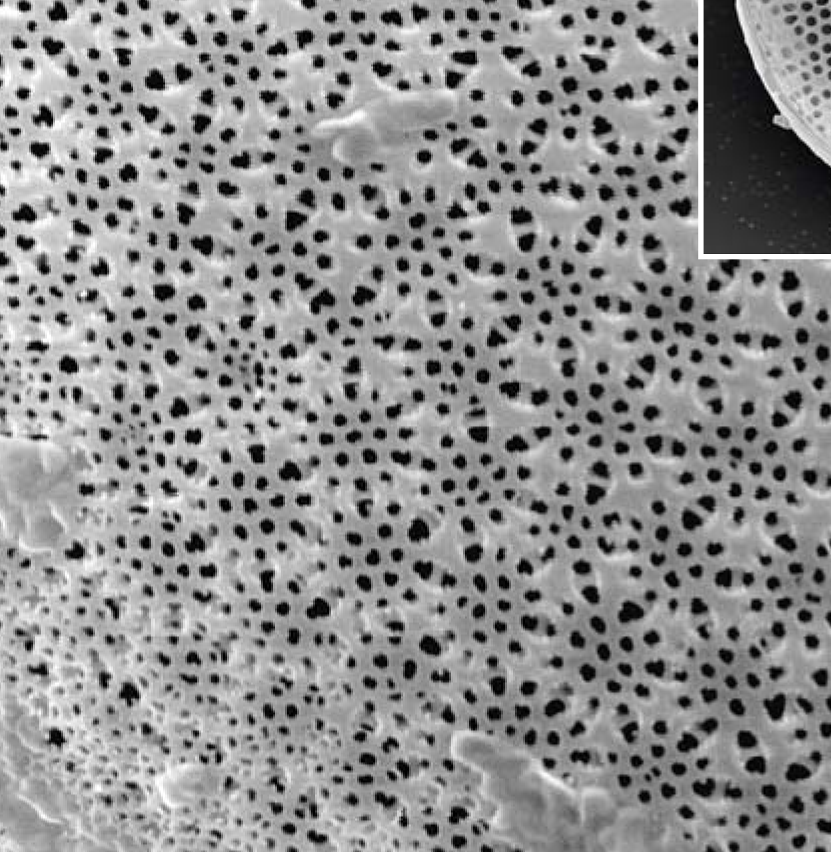


▲ **2. Diatomea central del género *Coscinodiscus* con una cubierta silícea en forma de caja. Ambas tecas, la superior (epiteca) y la inferior (hipoteca), constan de una valva y una pared lateral con diversas bandas de crecimiento. (Microscopía electrónica de barrido.)**



▶ **3. Sección sagital de la valva. La tabicación silícea le confiere el aspecto alveolado característico. En la zona inferior, un cloroplasto y el citoplasma celular. (Microscopía electrónica de transmisión.)**





4. Visión valvar (*arriba*) del género *Coscinodiscus*. El punto central de crecimiento, las costillas y los puentes laterales conceden al conjunto un aspecto poroso, que recuerda un "encaje de bolillos". La complejidad estructural del depósito de silicio (*izquierda*) da lugar a arquitecturas de atractiva simetría. (Microscopía electrónica de barrido).

CLAUDE CARRE (*diatomeas*); ALICIA DURO Y JOSE GARCIA VALERO (*arriba y abajo derecha*); NURIA CORTADELLAS, ALICIA DURO Y JOSE GARCIA VALERO (*abajo, izquierda*)

La necesidad de un proceso abierto

La administración de Obama debe reformar los contenidos de la agenda política y el modo en que los elabora

Jeffrey D. Sachs

Cuando el presidente Barack Obama prometió el cambio, se refería a dos tipos. El primero era un cambio sustancial: reformar los sectores clave de la economía, como la asistencia sanitaria, el cambio climático, los mercados financieros y la adquisición de armamento. El segundo era metodológico: mejorar el modo en que se elaboran las políticas públicas y la forma en que se toman las decisiones sobre los fondos públicos. Contra todo pronóstico, la administración de Obama está avanzando en el primero, pero a costa del segundo.

La importante legislación sobre la asistencia sanitaria ayudará a que la cobertura médica beneficie a un mayor número de estadounidenses y limitará algunos de los abusos de las compañías de seguros (denegación de cobertura) y el reembolso del gasto sanitario a la población. Asimismo, avanza también la legislación sobre el cambio climático, con la posibilidad de que se empiecen a limitar las emisiones de los gases de efecto invernadero gracias a un sistema de permisos por el que la economía de EE.UU. comenzará una larga transición a técnicas de bajas emisiones.

Pero lo inquietante es cómo se está consiguiendo ese modesto avance. La administración de Obama no ha presentado un plan coherente en forma de propuesta política detallada. Todas las actuaciones públicas importantes han pasado por las trastiendas del Congreso y se han decidido tras un proceso de negociaciones infestado de cabildeos entre intereses particulares y regionales. No ha habido un plan integral de estímulo económico, ni un plan claro para reformar la asistencia sanitaria, ni una estrategia definida para el control del cambio climático, etcétera. Si se hicieron planes entre bastidores, nunca se mostraron al público como tales.

Suele decirse que ese enfoque refleja un "aprendizaje" de los errores cometidos por la administración de Clinton en su intento de reformar la sanidad y el control del cambio climático. Esta vez, la estrategia de la administración consistirá en no proponer políticas detalladas que puedan ser rebatidas por constituir un blanco fácil. Dejará que se desarrollen primero las negociaciones entre los grupos de interés y las conducirá hábilmente hasta alcanzar un acuerdo de proyecto de ley. Esta es la lógica de la política como arte de lo posible.

Al negarse a proponer planes claros, la administración está debilitando considerable e innecesariamente la política. Lo primero y más importante es que no se rebaten las deficiencias de la legislación. El Congreso ni siquiera ha considerado las ventajas de gravar impuestos directos sobre el carbono, en vez de aplicar el sistema opaco de límites y comercio de emisiones, porque ha habido poca oportunidad para planificar políticas serias.

Segundo, las negociaciones entre bambalinas resultan una invitación clara a un considerable y sospechoso trasvase de riqueza. Los permisos de emisiones de carbono, que valen cientos de miles de millones de dólares, fueron adjudicados a intereses creados por medio de acuerdos privados sin contar con el conocimiento, debate o participación de los ciudadanos. Acuerdos semejantes en cuanto a asistencia sanitaria, reforma financiera y el proyecto de incentivo económico han dejado a la población sin entender quiénes son los verdaderos ganadores y perdedores de las acciones legislativas.

Además, la administración estadounidense ha perdido la oportunidad de informar a la población sobre los asuntos importantes. Sólo un tercio de la población cree real el cambio climático provocado por el hombre; no tienen la más mínima idea de que el control de las emisiones supone un coste modesto que conlleva grandes beneficios. La confusión se torna desesperante en lo que atañe a la asistencia sanitaria, el paquete de estímulo económico, la reforma financiera y otras iniciativas gubernamentales.

Para abordar asuntos tan cruciales y complejos es necesaria la participación de los expertos y la información ciudadana. En cada cuestión importante de la política, la administración debería adelantar un libro blanco explicando por qué presenta una iniciativa política, los costes y beneficios que va a suponer y cómo va a desarrollarse. Las propuestas legislativas deberían diseñarse en torno a la documentación de esa estrategia; asimismo, debería invitarse a grupos independientes de expertos para preparar las respuestas.

Lo más importante es que debe rechazarse, y no estimular, la acción de los grupos de presión. Si se le diera la oportunidad, la población respaldaría a la administración de Obama para hacer frente a tan estrechos intereses, los mismos que han contribuido a nuestros colapsos financieros, a una costosa asistencia sanitaria, a un parque automovilístico envejecido y a la inseguridad energética. Los científicos, los ingenieros y los especialistas en sociología política pueden colaborar ofreciendo soluciones reales. Una población informada y de confianza ayudaría a primar esas soluciones frente a intereses de cortas miras.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

Cocina al vacío

El control fino de la temperatura y el tiempo determinan la calidad de las elaboraciones culinarias

Pere Castells



1. Colocación de salmón en un baño termostatizado (roner). Se cuece a 50 ºC durante 15 minutos; se llega al corazón del producto entre 41 y 42 ºC. Debe servirse de inmediato.

La cocción al vacío difiere de los métodos culinarios tradicionales en dos aspectos clave: primero, se introducen los alimentos crudos en una bolsa termorresistente en ausencia total o parcial de aire; a continuación, se cuecen durante un tiempo determinado y a una temperatura inferior a la habitual, totalmente controlada y constante. El proceso suele realizarse en un baño de agua termostatizado, o "roner" (nombre derivado de los diseñadores del instrumento, los cocineros Joan Roca y Narcís Caner). Aunque sirve también un horno de vapor con control de temperatura, el roner permite cocciones más regulares.

La introducción de alimentos en una bolsa en donde se practica una extracción de aire viene aplicándose desde hace tiempo. Sin embargo, se utilizaba sólo a modo de técnica de conservación de café, frutas, verduras y productos cocidos. La ausencia de aire evita las reacciones de oxidación, lo que alarga la vida útil de los alimentos.

La primera aplicación del vacío a la cocción se remonta a 1974, cuando Georges Pralus recurrió a ella en la preparación de una terrina de hígado de pato. Pero la expansión de ese método culinario la marcaría la publicación, en 2003, de *La cocina al vacío*, libro de Joan Roca y Salvador Brugués que ahondaba en detalles técnicos y recetas. Contribuyeron también en su difusión Bruno Goussault y Thomas Keller.

FUNDACION ALICIA (*arriba*); EL CELLER DE CAN ROCA (*abajo*)



2. Cocción inmediata: bacalao tibio con espinacas, crema de Idiazábal, piñones y reducción de Pedro Ximénez.

La cocina al vacío ofrece varias ventajas. La cocción en bolsa y la extracción de aire aseguran la preservación de las cualidades organolépticas de los alimentos, puesto que impide la evaporación de sustancias volátiles y la pérdida de jugos interiores. Asimismo, evita la oxidación de alimentos sensibles (manzana, alcachofa) y reduce la proliferación de microorganismos aerobios.

El control de temperatura y tiempo permite obtener cada alimento en su punto justo de cocción. Si el muslo de pollo suele quedar jugoso y tierno, y la pechuga seca y astillosa, es porque se aplican la misma temperatura y tiempo de cocción a las dos partes, cuando requerirían cocciones distintas: la pechuga debería cocerse a temperatura inferior y durante menos tiempo para no perder su jugo.

Ahora bien, el método presenta también inconvenientes. Al ser menor la temperatura de trabajo, aumenta el riesgo de presencia de bacterias. Las cocciones cortas y por debajo de 65 ºC entrañan cierto riesgo microbiológico; no se produce pasteurización, por lo que debe servirse el plato de forma inmediata ("cocción directa"). Las cocciones largas y por encima de 65 ºC pueden guardarse en la nevera durante un tiempo prudencial, pues se consideran productos pasteurizados ("cocción indirecta").

Otro factor en contra es la bacteria tóxica *Clostridium botulinum*, que se reproduce en ambientes sin oxígeno (anaeróbicos). Sus esporas son difíciles de eliminar, incluso a temperaturas elevadas; se evita su multiplicación sólo a temperaturas inferiores a 3,3 ºC.

Para cocer las verduras solemos recurrir al hervido, que les quita color y sabor, o al horno, que las reseca. Si aplicamos la cocción al vacío, debemos tener en cuenta que a 85 ºC se hidrolizan las fibras; entre 80 y 85 ºC se produce un ablandamiento del almidón y de las paredes celulares. Las verduras acostumbran cocerse a 85 ºC; el tiempo dependerá de la proporción de fibras y almidones. El calabacín, que contiene 0,82 gramos de fibra dietética insoluble en agua por cada 100 gramos de producto, requiere unos 20 minutos de cocción; la zanahoria, cuyo contenido en fibra es superior (1,889 gramos por cada 100 de producto), 40 minutos.

En carnes y pescados, las condiciones de cocción vienen marcadas por las proteínas. Las proteínas del pescado ejercen una fuerza de cohesión menor que las cárnicas; su cocción se produce a partir de 45 ºC y, con ella, la salida de fluidos contenidos en las fibras musculares, cuyo componente principal es la miosina. La temperatura de cocción ideal del pescado es baja: entre 50 y 60 ºC de baño.

En las carnes, la fuerza del colágeno exige temperaturas y tiempos de cocción superiores. En general, se recomiendan temperaturas de baño de alrededor de 65 ºC. Las carnes duras requieren tiempos más largos; las blandas, más cortos. Coceremos una pechuga de pollo a 65 ºC durante 20 minutos, llegando a 62 ºC al corazón del producto; el riesgo microbiológico nos obligará a servirlo de inmediato. A la misma temperatura de baño, unas costillas de cerdo requerirán 24 horas de cocción; al producirse pasteurización, podrán guardarse en la nevera durante un tiempo prudencial.

La cocina actual y futura no puede concebirse ya sin la cocción al vacío. El próximo paso: su entrada en las casas.

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

REPERCUSION PLANETARIA DE UNA

Los temores se han concentrado en el enfrentamiento entre EE.UU. y Rusia, pero una guerra nuclear regional entre India y Pakistán podría oscurecer el sol y matar de hambre a buena parte de la humanidad

Alan Robock y Owen Brian Toon

Hace un cuarto de siglo, varios equipos internacionales de científicos demostraron que una guerra nuclear entre EE.UU. y la Unión Soviética produciría un "invierno nuclear". El humo de incendios gigantescos provocados por las bombas lanzadas sobre ciudades y zonas industriales envolvería el planeta y absorbería la luz solar en tal medida que la superficie terrestre se enfriaría, oscurecería y secaría, matando la vegetación a escala mundial y eliminando nuestras fuentes de alimentos. En verano, las temperaturas en la superficie serían de invierno.

El debate internacional acerca de esa predicción, animado por el astrónomo Carl Sagan, obligó a los líderes de ambas superpotencias a enfrentarse a la posibilidad de que su carrera de armamentos no sólo los pusiera en peligro a ellos, sino también a la humanidad entera. Los países, grandes y pequeños, exigieron el desarme.

El invierno nuclear se convirtió en un factor importante en la suspensión de la carrera de armas nucleares. En 2000, tras una mirada retrospectiva, el ex líder soviético Mijail S. Gorbachev declaraba que "los modelos elaborados por científicos rusos y norteamericanos mostraban que una guerra nuclear daría por resultado un invierno nuclear tremendamente destructivo para toda la vida en la Tierra; saber eso representó para nosotros, para las personas de moral y honor, un gran estímulo para actuar."

¿Por qué debatir en torno al tema, ahora que la guerra fría ha terminado? Sencillamente porque mientras otros países sigan haciéndose con armas nucleares, las guerras nucleares zonales podrían desencadenar una catástrofe global similar. Nuevos análisis revelan que en un conflicto entre India y

CONCEPTOS BASICOS

- Las bombas nucleares lanzadas en una confrontación entre India y Pakistán desencadenarían tormentas de fuego que proyectarían enormes masas de humo a la atmósfera superior.
- Las partículas permanecerían allí durante años, tapando el Sol, enfriando, oscureciendo y desecando la superficie terrestre. A ello seguiría el colapso de la agricultura y una hambruna general. Es decir, un enfriamiento global podría ser consecuencia de una guerra regional, no sólo de un conflicto entre EE.UU. y Rusia.
- Los escenarios para un enfriamiento se basan en modelos de ordenador. Pero la observación de las erupciones volcánicas, el humo de los incendios forestales y otros fenómenos respaldan la fiabilidad de los modelos.



RICHARD LEE

GUERRA NUCLEAR REGIONAL

Pakistán en el cual se lanzaran 100 bombas sobre ciudades y áreas industriales —sólo el 0,4 por ciento de las más de 25.000 ojivas que hay en el mundo— se generarían humos suficientes para arruinar la agricultura mundial. Una guerra regional podría causar pérdidas de vidas incluso en países alejados del conflicto.

La guerra regional como amenaza mundial

Con ordenadores modernos y modelos climáticos novedosos, nuestro equipo ha demostrado que no sólo eran correctas las ideas de los años ochenta, sino que los efectos durarían al menos 10 años, mucho más de lo que antes se creía. Y efectuando unos cálculos de evaluación para decenios, sólo ahora posibles con los ordenadores rápidos de última generación, e incluyendo en esos cálculos los mares y toda la atmósfera, hemos descubierto que el humo incluso de una guerra regional recibiría calor del Sol y ascendería para permanecer suspendido durante años en la atmósfera superior, velando la luz solar y enfriando la Tierra.

India y Pakistán, que entrambas reúnen más de 100 cabezas nucleares, pudieran ser los adversarios más inquietantes con capacidad para desencadenar un conflicto nuclear zonal. Además de EE.UU. y Rusia (que poseen miles), hay otros países bien armados nuclearmente: China, Francia y el R.U. disponen de centenares de ojivas nucleares; Israel tiene más de 80, Corea del Norte unas 10 e Irán bien podría estar procurándose las suyas.

En 2004, esa situación impulsó a uno de los autores (Toon) y después a Rich Turco, de la Universidad de California en Los Ange-



COSTOS HUMANOS

Una guerra nuclear total entre India y Pakistán masacraría ciudades de la región y acarrearía más muertes en todo el planeta.

20 millones de personas podrían morir en la región, directamente a consecuencia de las explosiones y los posteriores incendios e irradiaciones.

1000 millones de personas que en todo el mundo hoy reciben alimentos marginales podrían morir de hambre a causa del subsiguiente colapso de la agricultura.

les, ambos veteranos de las investigaciones de los años ochenta, a comenzar a evaluar cuáles serían los efectos ambientales globales de una guerra nuclear zonal, tomando como referencia una confrontación entre India y Pakistán.

Según las últimas valoraciones de David Albright, del Instituto para la Ciencia y la Seguridad Internacional, y de Robert S. Norris, del Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales, India tiene de 50 a 60 ingenios ensamblados (con plutonio suficiente para 100) y Pakistán 60. Ambos países siguen incrementando su arsenal. Los ensayos de armas nucleares indios y pakistaníes revelan que el rendimiento de las ojivas sería similar al rendimiento explosivo de 15 kilotones (equivalente a 15.000 toneladas de TNT) de la bomba que EE.UU. lanzó contra Hiroshima.

Toon y Turco, junto con Charles Bardeen, actualmente en el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, modelaron lo que ocurriría si se arrojaran 50 bombas del tipo Hiroshima contra objetivos pakistaníes de la máxima densidad de población y 50 ingenios similares contra la India.

Sostienen algunos que las armas nucleares se emplearían con tiento. Pero en la estela de caos, miedos y comunicaciones rotas que surgiría una vez iniciada una guerra nuclear, dudamos que los líderes limitaran sus ataques de modo racional. Tal posibilidad es particularmente cierta para Pakistán, un país pequeño y expuesto a la rápida invasión en un conflicto convencional. Peter R. Laroy, de la Escuela Naval Superior, ha analizado de qué modo podría desencadenarse un conflicto entre India y Pakistán y aduce que Pakistán podría enfrentarse a la decisión de emplear todo su arsenal nuclear antes de que India arrollase sus bases militares con fuerzas convencionales.

Por supuesto, esperamos que en cualquier guerra futura no haya ningún objetivo nuclear, pero los responsables políticos y los votantes deben saber qué posibilidades hay. Toon y Turco descubrieron que en los dos países podrían morir más 20 millones de personas a causa de las explosiones, los incendios y la radiactividad; una horrible matanza. Pero los investigadores se horrorizaron al comprobar que se generaría una enorme cantidad de humo, dado el megatamaño de las ciudades de ambos países, suponiendo que cada incendio consumiese la misma superficie que en Hiroshima y una cantidad de material inflamable por persona basado en diversos estudios.

Calcularon que las 50 bombas sobre Pakistán producirían tres teragramos de humo y cuatro las 50 bombas sobre India (un teragramo equivale a un millón de toneladas métricas).

Las observaciones, desde satélites, de los incendios forestales han mostrado que el humo puede ser impulsado hacia arriba a través de la troposfera (la capa inferior de la atmósfera) y luego, hacia la estratosfera inferior (la capa inmediatamente encima, que abarca casi 50 kilómetros). Toon y Turco hicieron asimismo algunos cálculos “en el reverso del sobre” relativos a la posible repercusión climática del humo, en la hipótesis de que penetrase en la estratosfera. La ingente magnitud de tales efectos les

NASA/THE VISIBLE EARTH (*globo*); JEN CHRISTIANSEN (*cortes de la atmósfera y mapas de densidad de humo*)

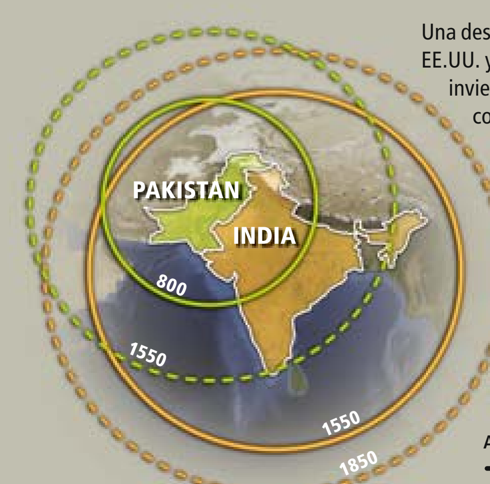
EL HUMO ENVUELVE LA TIERRA Y OSCURECE EL SOL



Dos días después, el humo de los incendios iniciados por las bombas habría atravesado la troposfera. El Sol calentaría entonces las minúsculas partículas y las impulsaría hacia la estratosfera. En esta zona nunca se dan precipitaciones, por lo cual las partículas tardarían unos 10 años en precipitarse sobre la superficie terrestre. El humo de la troposfera se despeja en cosa de una semana.

Los incendios provocados por 100 ojivas detonadas por India y Pakistán generarían al menos cinco teragramos de humo. Mediante la simulación de las condiciones meteorológicas de un 15 de mayo medio, los autores demostraron que, al cabo de cinco días, la región estaría

INDIA CONTRA PAKISTAN



Una descarga de ataques nucleares entre EE.UU. y Rusia sumergiría a la Tierra en el invierno nuclear, pero lo mismo harían unos conflictos regionales. India y Pakistán, países hace tiempo enfrentados, tienen más de 50 ojivas nucleares cada uno; si lanzasen todas esas bombas sobre ciudades y zonas industriales, el humo de los incendios colapsaría la agricultura planetaria durante diez años. Los misiles balísticos de ambos países podrían llegar a la mayoría, si no a todas, las regiones del territorio del otro.

Alcance aproximado de los misiles (en km)
— Alcance operativo
– – En desarrollo

A escala mundial, nueve países disponen de armas nucleares. Todos ellos, salvo Corea del Norte e Irán, podrían poner en peligro la civilización si emplearan sus arsenales.

PAIS	OJIVAS
Rusia	15.000
EE.UU.	9900
Francia	350
China	200
R.U.	200
Israel	80
Pakistán	60
India	50
Corea del Norte	<10
Irán	¿En desarrollo?

Fuente: Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales

convenció de que necesitaban la colaboración de un experto en modelos climáticos.

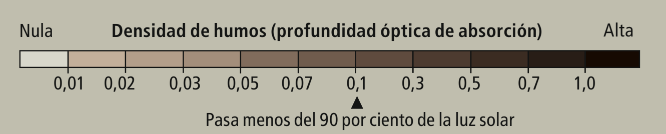
Resultó entonces que otro de los autores (Robock) ya estaba trabajando con Luke Oman, actualmente en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, que estaba acabando su doctorado en la Universidad de Rutgers sobre los efectos climáticos de las erupciones volcánicas, y con Geogiy L. Stenchikov, también en Rutgers y autor del primer trabajo ruso sobre el invierno nuclear. Entre los tres desarrollaron un modelo climático que podía emplearse con notable facilidad en los cálculos sobre explosiones nucleares.

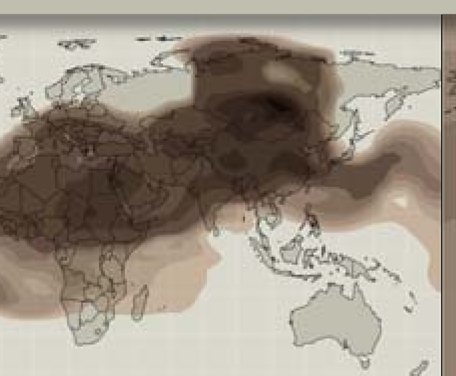
Robock y sus colegas, prudentes y cautelosos, introdujeron cinco teragramos de humo en su modelo de troposfera superior sobre India y Pakistán en un hipotético 15 de mayo. El modelo calculó de qué modo el viento impulsaría el humo por el mundo entero y de qué modo se posarían desde la atmósfera las partículas de humo. En dos semanas, el humo cubriría todos los continentes. El humo de hollín negro absorbería la luz solar, se calentaría y ascendería a la estratosfera. En ésta nunca llueve, por lo que no hay precipitaciones que limpien el aire; las partículas se asientan por gravedad, con la resistencia del aire. Las partículas de hollín son muy pequeñas, con un diámetro medio de sólo 0,1 micras, por lo que descienden muy lentamente. Además, durante las horas diurnas

Pakistán podría decidir emplear su arsenal nuclear antes de que India arrasara sus bases militares.

JEN CHRISTIANSEN (*mapa de alcance de misiles*); NASA/THE VISIBLE EARTH (*mapa de fondo*); CATHERINE WILSON (*banderas*)

cubierta por un humo denso. Nueve días después, la carbonilla se extendería por todo el globo. A los 49 días, las partículas cubrirían las zonas habitadas, bloqueando suficiente luz solar para que el cielo pareciese perpetuamente nublado en el planeta entero.







POR QUE CREERLO

Creen algunos que la teoría del invierno nuclear desarrollada en los ochenta ha caído en descrédito. Por eso quizá se sorprendan ante nuestra nueva aseveración de que una guerra nuclear zonal, entre India y Pakistán, por ejemplo, podría devastar la agricultura de todo el planeta.

La teoría original estaba rigurosamente validada. Su fundamento científico tenía el respaldo de investigaciones realizadas por la Academia Nacional de Ciencias, por estudios patrocinados por las Fuerzas Armadas de EE.UU. y por el Consejo Internacional de Sindicatos Científicos, que incluían representantes de 24 academias nacionales de la ciencia y otros organismos científicos.

Nuestros trabajos han aparecido en publicaciones de revisión paritaria. Al parecer, seguimos siendo los únicos que prosiguen con las investigaciones acerca de los riesgos medioambientales de los intercambios nucleares. Instamos a otros a que evalúen y repitan los cálculos, tanto para los efectos de una conflagración entre superpotencias como para unas guerras nucleares más zonales.

se elevan cuando el sol las calienta, y así se retrasa su desaparición.

Mostraron los cálculos que el humo llegaría en la estratosfera superior mucho más alto que las partículas de sulfato producidas en las erupciones volcánicas episódicas. Las partículas de sulfato son transparentes y absorben mucha menos luz solar que el hollín y, además, son mayores, en torno a las 0,5 micras. Las partículas volcánicas permanecen unos dos años suspendidas en el aire, pero el humo de los incendios nucleares duraría un decenio.

Heladas veraniegas

La reacción climática al humo fue sorprendente. La luz solar sufría un amortiguamiento inmediato y el planeta se enfriaba hasta temperaturas inferiores a cualquiera de las que se dieron durante los últimos 1000 años. El enfriamiento global medio, de unos 1,25 grados Celsius, persistía varios años; pasados incluso 10 años, la temperatura seguía 0,5 grados Celsius por debajo de la normal.

Los modelos mostraron asimismo una reducción del 10 por ciento en las precipitaciones en todo el mundo. Disminuían tanto las precipitaciones como las corrientes fluviales y la humedad de los suelos, porque el bloqueo de la luz solar reduce la evaporación y debilita el ciclo hidrológico. Sin embargo, la sequía se concentraba en gran parte en las latitudes bajas, pues el enfriamiento global retardaría la célula de circulación de aire de Hadley en los trópicos, responsable en buena parte de la precipitación global. En las regiones asiáticas de monzones, la lluvia se reduciría en un 40 por ciento.

Quizás el enfriamiento no parezca cosa de particular preocupación. Pero conviene saber que una leve disminución de temperatura puede acarrear consecuencias graves. El enfriamiento y menos luz solar, por ejemplo, acortarían las estaciones de crecimiento vegetal en las latitudes medias. Análisis de los períodos subsiguientes a las erupciones volcánicas masivas proporcionaron una mayor compresión de los efectos del enfriamiento. De vez en cuando, esas erupciones producen un enfriamiento temporal que dura un año o dos. La mayor de los últimos 500 años, la erupción en 1815 del Tambora en Indonesia, oscureció el Sol y produjo un enfriamiento global de 0,5 grados durante un año; 1816 pasó a ser conocido como "el año sin verano", o "mil ochocientos hielos mortales".

En Nueva Inglaterra, aunque la temperatura media del verano bajó sólo unos pocos grados, hubo heladas que arrasaron las cosechas cada mes. Tras la primera helada, los agricultores volvieron a plantar, sólo para ver sus cultivos destrozados por la helada siguiente. El precio del cereal se disparó; el del ganado cayó en picado, pues los agricultores vendían animales a los que no podían alimentar, y se inició una migración masiva desde Nueva Inglaterra hacia el Medio Oeste, pues a la gente le llegaban noticias acerca de aquella tierra fértil.

En Europa, el tiempo era tan frío y sombrío, que el mercado de ganado se hundió. Hubo hambrunas generalizadas y Mary Shelley, a sus 18 años, se inspiraba para escribir su *Frankenstein*.

Ciertas variedades de cultivo, tales como el trigo de invierno, soportan unas temperaturas más bajas, pero la falta de luz solar inhibe su capacidad de crecimiento. En nuestro escenario, la luz solar se filtraría a través de la neblina de humo suspendida en las alturas, pero a nivel del suelo cada día parecería totalmente nublado. Agrónomos y agricultores no podrían desarrollar las semillas necesarias ni ajustar las prácticas agrícolas para unas condiciones radicalmente diferentes, a menos que supieran con antelación suficiente qué cabría esperar.

Además del enfriamiento, la desecación y la oscuridad, el calentamiento de la estratosfera a causa del humo daría como resultado el agotamiento del ozono; pues las reacciones que lo crean y lo destruyen dependen de la temperatura. Michael J. Mills, de la Universidad de Colorado en Boulder, con un modelo de clima independiente del propuesto por Robock, llegó a resultados similares para la ascensión del humo y los cambios de la temperatura estratosférica. Aunque la temperatura en la superficie se enfriaría un poco, concluyó, la estratosfera se calentaría en más de 50 grados centígrados, pues las partículas de humo, negras, absorben la luz solar.

A su vez, ese calentamiento modificaría el régimen eólico en la estratosfera, que transportaría hasta los límites superiores de ésta óxidos de nitrógeno destructores de ozono. La combinación de altas temperaturas y óxidos de nitrógeno reduciría el ozono hasta los peligrosos niveles que ahora se dan cada primavera por debajo del agujero de ozono antártico. A consecuencia de la disminución de ozono, aumentaría considerablemente en el suelo la radiación ultravioleta.

La disminución de la luz solar y de las precipitaciones, los períodos de frío, el acortamiento de las épocas de crecimiento vegetal y el aumento de la radiación ultravioleta reducirían o eliminarían la producción agrícola. El enfriamiento y la pérdida de ozono serían particularmente intensos en las latitudes medias y altas de ambos hemisferios, mientras que el descenso de las precipitaciones alcanzaría su máximo en los trópicos.

Los daños específicos infligidos en el medio por cada uno de los cambios mencionados dependerían de cada cultivo concreto, del tipo de suelo, de las prácticas agrícolas y de los patrones meteorológicos regionales. Nadie ha efectuado análisis completos y detallados acerca de esas reacciones del cultivo agrícola. Incluso en tiempos normales, la alimentación de una población humana en crecimiento depende del transporte de los alimentos entre distintos puntos del globo para compensar las escaseces agrarias regionales debidas a la sequía y a los cambios meteorológicos estacionales.

La cantidad total de cereales hoy almacenada en el planeta podría alimentar a la población mundial durante un par de meses [*véase* "Crisis alimentarias: ¿una amenaza para la civilización?" por Lester R. Brown; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2009]. La mayoría de las ciudades y los países han acopiado suministros alimentarios para períodos muy cortos y las carestías de alimentos (así como el alza de los precios) han aumentado en los últimos años. Una guerra nuclear podría provocar descensos inmediatos de la producción en casi todo el mundo y un pánico generalizado a escala mundial podría paralizar el sistema global de comercio de productos agrícolas, con fuertes carestías en muchos lugares.

Una guerra nuclear entre India y Pakistán, o entre otras potencias nucleares regionales, amenazaría directamente con el hambre a unos mil millones de personas que en todo el mundo viven ahora con suministros alimenticios marginales.

Se piden pruebas independientes

Es habitual que los científicos ensayen sus modelos y teorías experimentando, pero es obvio que en este caso no podemos experimentar. Así pues, buscamos casos parecidos que puedan corroborar nuestro modelo.

Ciudades incendiadas. Por desgracia, las tormentas de fuego creadas por unas intensas liberaciones de energía han lanzado enormes cantidades de humo a la atmósfera superior. San Francisco ardió a consecuencia del terremoto de 1906. Ciudades enteras fueron reducidas a pavesas durante la Segunda Guerra Mundial: Dresde, Hamburgo, Tokio, Hiroshima y Nagasaki, entre otras. Aquellos hechos confirman que el humo procedente de incendios urbanos intensos se eleva hacia la atmósfera superior.

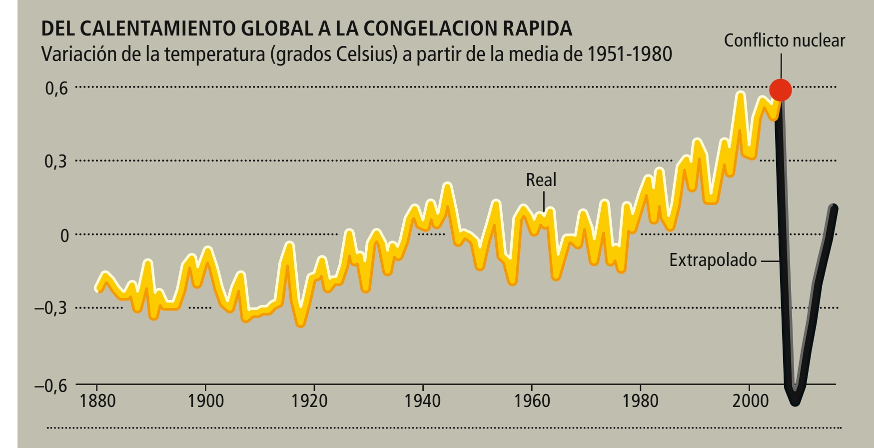
Ciclo estacional. En un invierno real, el tiempo es más frío porque los días son más cortos y la luz solar es menos intensa; el simple cambio de estaciones nos permite cuantificar los efectos de la disminución de la radiación solar. Nuestros modelos climáticos recrean per-

El colapso de la agricultura

Cinco teragramos de humos envolviendo la Tierra provocarían una bajada de las temperaturas y un aumento de la radiación ultravioleta, amenazando las cosechas a escala mundial.

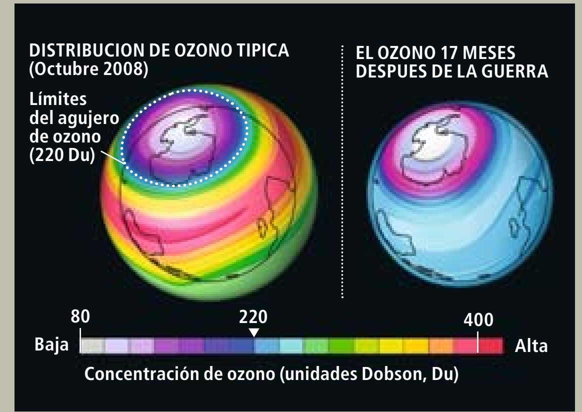
LA TEMPERATURA

La temperatura media del aire superficial en todo el globo disminuiría 1,25 grados Celsius, y 10 años después aún seguiría 0,5 grados más baja. La depresión provocaría además heladas invernales.



AGOTAMIENTO DEL OZONO

El humo absorbería luz solar suficiente para caldear la estratosfera, impulsando hacia arriba los óxidos de nitrógeno, rebajando la concentración de ozono. Como efecto, el agujero en el ozono que anualmente se sitúa sobre el polo sur (*izquierda, violeta y azul oscuro*) se extendería a todo el globo (*derecha*), permitiendo que en la superficie terrestre incidieran peligrosos niveles de radiación ultravioleta.





COSECHAS MALOGRADAS

La luz solar disminuida, las temperaturas más bajas y la sequía acortarían las estaciones de crecimiento. Heladas fuera de estación y más radiación ultravioleta abriéndose paso por una capa de ozono más tenue dañarían aún más las cosechas. Toda la producción agrícola disminuiría de inmediato a escala mundial, paralizando el comercio alimentario. Arriba, en 2007 una ola de frío intenso dañó el 70 por ciento de la cosecha californiana de cítricos.

CATHERINE WILSON (*gráfica*); FUENTE DE LA GRAFICA: "A CLOSER LOOK AT UNITED STATES AND GLOBAL SURFACE TEMPERATURE CHANGE," POR J. E. HANSEN ET AL., EN *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 106; 2001 (*variación real de la temperatura*); GEORGE RETSECK (*globos de ozono*); JUSTIN SULLIVAN *Getty Images* (*naranjas*)





1. DETERMINADOS EPISODIOS REALES, pensemos en las erupciones volcánicas explosivas y los incendios forestales arrasadores, sirven para someter a comprobación las simulaciones que predicen las consecuencias de la guerra nuclear. En 1991, el volcán del monte Pinatubo lanzó cenizas a kilómetros de altura (*arriba*) que posteriormente formaron unas capas de partículas diferenciadas que circunvalaron el planeta (*abajo*).

fectamente el ciclo estacional, lo que confirma que reflejan correctamente los cambios en la luz solar.

Erupciones. Las erupciones volcánicas explosivas, como las del Tambora en 1815, el Krakatoa en 1883 y el Pinatubo en 1991 ofrecen algunas lecciones. Los vientos transportaron alrededor del mundo las nubes de aerosol de sulfato que de resultas se formaron en la estratosfera. Tras cada erupción, la temperatura en la superficie se desplomó proporcionalmente al espesor de la nuble de partículas. A raíz de la erupción del Pinatubo, la temperatura media global en la superficie descendió en torno a 0,25 grados Celsius. Disminuyeron las precipitaciones globales, las corrientes fluviales y la humedad de los suelos. Nuestros modelos reproducen esos efectos.

Incendios forestales. A veces, el humo de los grandes incendios forestales penetra en la troposfera y en la estratosfera inferior y es arrastrado a grandes distancias, generando enfriamiento. Nuestros modelos se acomodan también a esos efectos.

La extinción de los dinosaurios. Hace 65 millones de años, un asteroide impactó en la península de Yucatán. La nube de polvo resultante, mezclada con el humo de los incendios, ocultó el Sol, matando a los dinosaurios. El volcanismo masivo que a la vez se daba en la India pudo haber agravado los efectos. Esos eventos nos enseñan que grandes cantidades de aerosoles presentes en la atmósfera terrestre pueden cambiar el clima en cuantía suficiente para acabar con especies vigorosas.

En el pasado hemos empleado tales analogías para ensayar y mejorar nuestros modelos; pero esperamos que otros avancen en esos trabajos. Serían muy instructivos unos modelos independientes que confirmaran o contradijeran los nuestros; y especialmente bienvenidas las investigaciones sobre las repercusiones en la agricultura, que nosotros no hemos llevado a cabo.

Abolición: la única política

Suelen abundar interpretaciones incorrectas acerca del invierno nuclear. Por ejemplo, la idea de que los efectos climáticos habían sido desmentidos; esto no es en absoluto cierto. También se afirma que el mundo sufriría un “otoño nuclear” y no un invierno. Pero nuestros nuevos cálculos revelan que los efectos sobre el clima, incluso los de un conflicto regional, serían generalizados y graves.

Los modelos y los ordenadores empleados en los años ochenta no estaban todavía capacitados para simular el ascenso y la persistencia del humo, ni el mucho tiempo que tardarían los mares en recobrar el calor cuando el humo al fin se disipara; los modelos actuales para un intercambio nuclear de envergadura predicen un invierno nuclear, no un otoño.

Otra falsa impresión es que el problema, aunque existiera, ha sido solventado con el fin de la carrera de armas nucleares. De hecho, un invierno nuclear podrían producirlo fácilmente los arsenales nucleares americano y ruso, tal como se ha decidido que queden en 2012. Además, el creciente número de estados nuclearizados eleva las probabilidades de que se inicie una guerra, deliberada o accidentalmente.

Corea del Norte ha amenazado con guerra si no se deja de parar e inspeccionar sus barcos en busca de materiales nucleares. Afortunadamente, Corea del Norte no dispone ahora de un arsenal nuclear utilizable, pero podría tener uno con capacidad de alcance global en el futuro próximo.

Algunos líderes indios extremistas propugnaron atacar Pakistán con armas nucleares a raíz de los últimos ataques terroristas sobre India. Como ésta podría fácilmente invadir Pakistán con fuerzas convencionales, es concebible que Pakistán atacase a India con armas nucleares si creyese que India fuese a seguir con la ofensiva.

Irán ha amenazado con destruir Israel, ya potencia nuclear, que a su vez ha jurado no

Los autores

Alan Robock es profesor de climatología en la Universidad de Rutgers y director asociado de su Centro de Predicciones Ambientales, donde investiga diversos aspectos del cambio climático. Es miembro de la Sociedad Americana de Meteorología y participante de la Comisión Intergubernamental sobre el Cambio Climático. **Owen Brian Toon** es jefe del departamento de ciencias atmosféricas y oceánicas en la Universidad de Colorado en Boulder y miembro del Laboratorio de Física Atmosférica y Espacial de dicho centro. Pertenece a la Sociedad Americana de Meteorología y a la Unión Americana de Geofísica.

TIME & PICTURES *Getty Images* (*Monte Pinatubo*); CORBIS (*capas de partículas*)

permitir jamás que Irán se convierta en potencia nuclear. Cada uno de esos ejemplos representa a un país que imagina su existencia amenazada por completo y con escaso margen de aviso. Todos esos puntos conflictivos son potencialmente susceptibles de estallar de forma súbita.

La primera guerra nuclear conmocionó tanto al mundo que, pese al masivo crecimiento desde entonces de esas armas, éstas nunca han vuelto a emplearse. Pero el único modo de eliminar la posibilidad de una catástrofe climática es eliminarlas. Una reducción pronta de los arsenales estadounidense y ruso serviría de ejemplo para el resto del mundo de que las armas nucleares no pueden emplearse, ni son necesarias.

En el marco del Tratado Estratégico de Reducción Ofensiva, EE.UU. y Rusia se comprometieron a dejar su arsenal en 1700 y 2200 las ojivas nucleares estratégicas desplegadas para finales de 2012. En julio de 2009, el presidente Barack Obama y el presidente ruso Dimitri Medvedev acordaron rebajar más esos límites, hasta dejarlo en 1500 y 1675 para 2016. Aunque sean recomendables unos arsenales nucleares menores, nuestros resultados actuales muestran que incluso las cifras más pequeñas bastan para destruir la agricultura mundial, al igual que una guerra nuclear regional.

Si esas armas se emplearan contra objetivos urbanos, matarían a centenares de millones de personas y una ingente humareda de 180 Tg inundaría la atmósfera del planeta. Durante varios años, las temperaturas permanecerían bajo cero, incluso en verano, en la mayoría de las regiones agrícolas importantes. Hasta las ojivas de un submarino portamisiles podrían producir humo suficiente para ocasionar un desastre ambiental de alcance global.

La combinación de proliferación nuclear, inestabilidad política y demografía urbana podrían constituir uno de los mayores peligros para la estabilidad de la sociedad desde los albores de la humanidad. Sólo la abolición de las armas nucleares impedirá la pesadilla. La inmediata reducción de los arsenales estadounidense y ruso al mismo nivel que el de otras potencias nucleares (unos pocos centenares) conservaría el poder disuasorio, reduciría las posibilidades de un invierno nuclear y alentaría al resto del mundo a proseguir los esfuerzos en pro de la eliminación.

Obama, consciente de la cuestión, declaraba en su primera conferencia de prensa como presidente, el 9 de febrero de 2009: "Es importante que EE.UU., de común acuerdo con Rusia..., reinicie las conversaciones acerca de cómo podemos empezar a reducir nuestros arsenales nucleares de un modo tan efectivo, que nuestra posición nos permita acudir a otros países y comenzar a recomponer conjuntamente los tratados de no proliferación". Después, el 24 de septiembre, el presidente consiguió que el Consejo de Seguridad de Naciones Unidas aprobara un borrador de resolución para redoblar los esfuerzos encaminados a desembarazar al mundo de las armas nucleares. Los resultados de nuestros trabajos de modelado sólo refuerzan las razones para apoyar todos los avances que desde ahora se den en esa dirección.

El único modo de eliminar las posibilidades de una catástrofe climática es eliminar las armas nucleares.



CHARLES DHARAPAK *Ap Photo*

2. EL PRESIDENTE BARACK OBAMA y el presidente ruso Dmitri Medvedev firmaron un acuerdo en julio de 2009 para reducir el número de ojivas nucleares estratégicas desplegadas por cada país. Reducciones ulteriores podrían estimular a todas las naciones nucleares para que limiten drásticamente sus armamentos a escala mundial.

Bibliografía complementaria

CONSEQUENCES OF REGIONAL-SCALE NUCLEAR CONFLICTS. Owen B. Toon, Alan Robock, Richard P. Turco, Charles Bardeen, Luke Oman y Georgiy L. Stenchikov en *Science*, vol. 315, págs. 1224-1225; 2 de marzo de 2007.

CLIMATIC CONSEQUENCES OF REGIONAL NUCLEAR CONFLICTS. A. Robock, L. Oman, G. L. Stenchikov, O. B. Toon, C. Bardeen y R. P. Turco en *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 7, n.º 8, págs. 2003-2012; abril, 2007.

NUCLEAR WINTER REVISITED WITH A MODERN CLIMATE MODEL AND CURRENT NUCLEAR ARSENALS: STILL CATASTROPHIC CONSEQUENCES. Alan Robock, Luke Oman and Georgiy L. Stenchikov en *Journal of Geophysical Research*, vol. 112; julio, 2007.

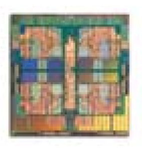
MASSIVE GLOBAL OZONE LOSS PREDICTED FOLLOWING REGIONAL NUCLEAR CONFLICT. Michael J. Mills, Owen B. Toon, Richard P. Turco, Douglas E. Kinnison y Rolando R. Garcia en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, n.º 14, págs. 5307-5312; abril de 2008.

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF NUCLEAR WAR. Owen B. Toon, Alan Robock y Richard P. Turco en *Physics Today*, vol. 61, n.º 12, págs. 37-42; diciembre 2008.

MICROCHIPS DEL FUTURO INMEDIATO

□ □ □ El retroceso de los límites del diseño consigue circuitos integrados cada vez más diminutos, rápidos y económicos

◀ **CADA PROCESADOR PHENOM X4 de AMD (*en red, a la izquierda*) encapsula 758 millones de transistores.**



◀ **Tamaño real del chip**

Las innovaciones en diseño y fabricación de semiconductores han permitido cumplir la famosa predicción de Gordon Moore en 1975: duplicar cada dos años el número de transistores integrados en un microchip de silicio. A medida que avanza la miniaturización, las señales eléctricas tienen que recorrer distancias menores y el funcionamiento se acelera, lo que reduce notablemente los costes industriales y los precios al cliente. Durante 35 años se ha mantenido con bastante precisión esa trayectoria.

Sabíamos, no obstante, que en algún momento se llegaría al límite. Cuando el grosor de los transistores se reduce hasta unas decenas de átomos, se tropieza ya con las leyes básicas de la física. Antes, incluso, iban a surgir problemas de índole práctica. Apiñar estrechamente transistores tan diminutos manteniendo un alto rendimiento de producción —chips útiles/defectuosos— quizá tendría un coste excesivo. Además, el calor generado por la operación de esa maraña de transistores podría empezar a cocer los propios elementos.

Por supuesto, las barreras se alzaron hace ya varios años. El motivo principal de que los ordenadores personales corrientes utilicen hoy pastillas de doble núcleo, con dos procesadores en vez de uno (chips "dual core"), son los problemas que crea la refrigeración de un gran número de transistores encapsulados en un solo chip. Los ingenieros prefieren yuxtaponer dos o más microcircuitos y programarlos para que procesen la información en paralelo.

Parece, pues, que la ley de Moore va perdiendo vigencia. ¿Cómo podrán entonces construirse microcircuitos más potentes? Se podrían elegir otras arquitecturas distintas o perfeccionar nanomateriales susceptibles de ensamblarse átomo a átomo. Otro camino sería refinar nuevos métodos para procesar información, tales como la computación cuántica y biológica. A continuación se exponen una gama de innovaciones, muchas de ellas en fase experimental, que de aquí a veinte años podrían mantener los productos informáticos en la senda de lo "más pequeño, más veloz, más barato", que tanto nos ha servido.

CONCEPTOS BASICOS

- Quizá pronto sea imposible achicar más los transistores de un circuito integrado. Habrá que modificar materiales y diseños para continuar el progreso en microelectrónica.
- Los nanohilos, como el grafeno, las partículas cuánticas y las moléculas biológicas, podrían entre todos alumbrar nuevas generaciones de microcircuitos más potentes que los mejores de hoy.

TAMAÑO: CRUCE DE BARRAS

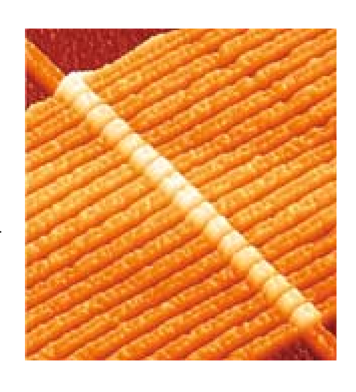
Los transistores comerciales más pequeños que hoy se fabrican miden 32 nanómetros de ancho (alrededor de 96 átomos de silicio). La industria reconoce la extrema dificultad de obtener dimensiones menores de 22 nanómetros mediante las técnicas litográficas que llevan decenios perfeccionándose.

Una alternativa, el diseño en barras cruzadas, ofrece dimensiones características similares, pero mayor potencia de computación. En vez de fabricar todos los transistores en un mismo plano (como coches embutidos en los carriles de una congestionada autopista de silicio), sendos conjuntos de nanohilos paralelos se cruzarán perpendicularmente en planos distintos, entre los que se interpondrá una capa separadora del grosor de una molécula.

Las numerosas intersecciones existentes entre los dos conjuntos de hilos pueden actuar como conmutadores, o resistores mnémicos (*memristors*). Estos elementos pueden representar los dígitos binarios "1" y "0", a la manera de los transistores, y además almacenar información; la combinación de estas propiedades permite realizar múltiples funciones de computación. En esencia, un memristor puede hacer el trabajo de 10 a 15 transistores.

Los laboratorios de Hewlett-Packard han diseñado prototipos de memristor con hilos cruzados de titanio y platino de 30 nanómetros de anchura, en los que se utilizan materiales y procesos semejantes a los ya optimizados para la industria de semiconductores. Los investigadores de la firma esperan reducir hasta ocho nanómetros la dimensión de cada hilo. Otros grupos se dedican a modelar hilos cruzados de silicio, titanio y sulfuro de plata.

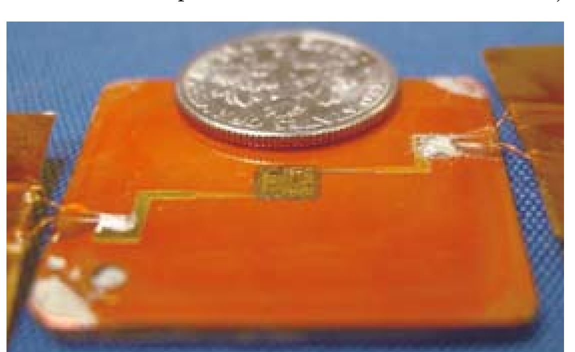
1. EL MEMRISTOR, de Hewlett-Packard. Este resistor mnémico es un nuevo tipo de elemento de circuito creado en cada intersección de nanohilos superpuestos.



CORTESIA DE AMD GLOBAL COMMUNICATIONS (*chips*); CORTESIA DE R. STANLEY WILLIAMS *Hewlett-Packard Labs* (*estructura en barras cruzadas*)

CALENTAMIENTO: REFRIGERACION O VENTILACION

Cuando se integran hasta mil millones de transistores en un chip, la liberación del calor generado por las conmutaciones se convierte en un grave problema. Los ordenadores personales tienen sitio para un ventilador; aun así, sólo pueden enfriar hasta disipaciones de 100 watt por cada chip: se conciben, pues, novedosas alternativas. La agenda portátil de MacBook se encierra en una caja bruñida de un aluminio de buena conductividad térmica que actúa como sumidero de calor. En el ordenador personal Power Mac G5 de Apple, se hace circular líquidos por unos microcanales abiertos en la cara inferior de su chip procesador.



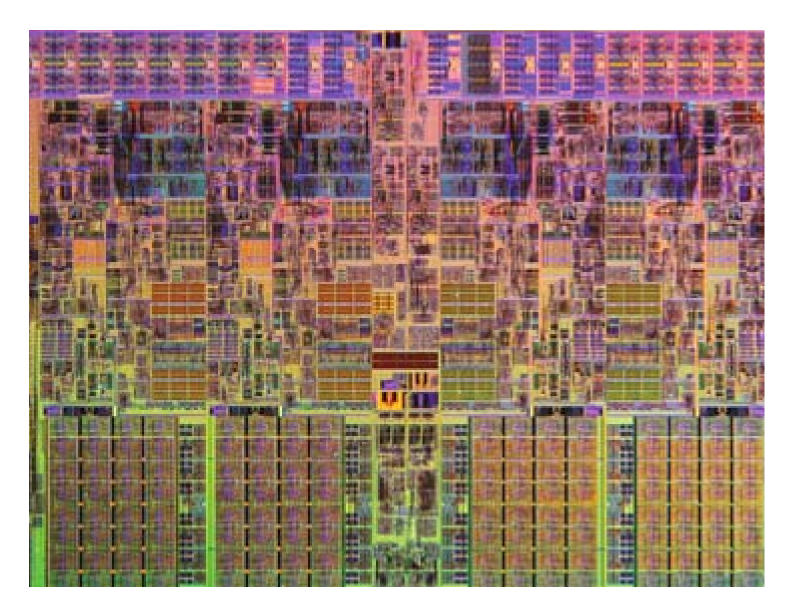
2. PARCHE REFRIGERADOR (*de oro, en el centro*) de teluro de bismuto que transfiere el calor procedente de un chip mucho mayor que tiene fijado encima a una fina capa de disipación (*naranja*). El parche y la capa ocupan menos espacio que los actuales sumideros de calor.

Combinar fluidos con electrónica tal vez no sea muy acertado; los utensilios portátiles más pequeños, como los teléfonos inteligentes, carecen de espacio para conducciones de líquido o ventiladores. Un grupo de investigadores dirigido por Intel ha realizado una supercelosía en forma de fina capa de telururo de bismuto en el encapsulado que encierra el chip (*arriba*). Ese material termoeléctrico convierte los gradientes de temperatura en electricidad y refrigera el propio chip.

Partiendo de un trabajo de la Universidad Purdue, la nueva compañía Ventiva está construyendo un minúsculo "ventilador" de estado sólido que carece de piezas móviles y crea una brisa mediante el efecto de ventilación corona: propiedad ya explotada por los silenciosos purificadores de aire domésticos. Una rejilla ligeramente cóncava posee hilos activos que generan un microplasma; los iones contenidos en esa mezcla de aspecto gaseoso impulsan las moléculas de aire desde los hilos hasta una placa contigua. Se consigue así un flujo de aire más enérgico que el de un ventilador típico, pero con un equipo mucho más reducido.

Otras innovaciones se basan en utilizar ventiladores de motor Stirling; un tanto voluminosos, crean, empero, viento sin consumir electricidad. Actúan por la diferencia de temperatura entre las zonas calientes y frías del chip.

ARQUITECTURA: NUCLEOS MULTIPLES



3. PROCESADOR INTEL I7 compuesto por cuatro núcleos (*parte inferior*) que trabajan en paralelo para que la computación sea más rápida.

CORTESIA DE INTEL

Los transistores pequeños pueden conmutarse con más rapidez entre los estados que representan "0" y "1", lo que acelera el funcionamiento del microchip. Pero el ritmo de sincronismo —número de instrucciones que el chip puede procesar por segundo— alcanza un tope entre tres y cuatro gigahertz cuando el calentamiento llega al límite tolerable. El deseo de mejorar aún más las prestaciones sin exceder los límites de calor y velocidad ha sugerido el emplazamiento de dos procesadores —núcleos— en un mismo chip.

Cada uno de los núcleos trabaja a la misma velocidad que los procesadores anteriores; mas, al funcionar ambos en paralelo, pueden procesar más datos en un tiempo dado, con menor consumo de electricidad y menos generación de calor. Los ordenadores personales de vanguardia ostentan núcleos cuádruples, como el Intel i7 y el AMD Phenom X4.

Los superordenadores más potentes del mundo contienen miles de núcleos procesadores. En los productos de consumo, incluso con un corto número de núcleos, la máxima eficacia exige técnicas de programación nuevas, capaces de fragmentar los datos y el procesamiento y de coordinar las tareas. Las bases de la programación en paralelo se elaboraron en los años ochenta y noventa para los supercomputadores. Ahora, pues, se trata de crear lenguajes y herramientas aptas para desarrollar programas de aplicaciones de consumo. Microsoft Research, por ejemplo, ha introducido el lenguaje de programación F#. Un lenguaje anterior, el Erlang, original de la compañía sueca Ericsson, ha inspirado otros más modernos, como los Clojure y Scala. La Universidad de Illinois y otras instituciones se afanan por la programación en paralelo para microcircuitos de núcleos múltiples.

Si pudieran perfeccionarse los métodos, los dispositivos móviles y de mesa podrían contener docenas de procesadores paralelos, que individualmente alojaran menos transistores que los microchips actuales y trabajaran en grupo con mayor rapidez.

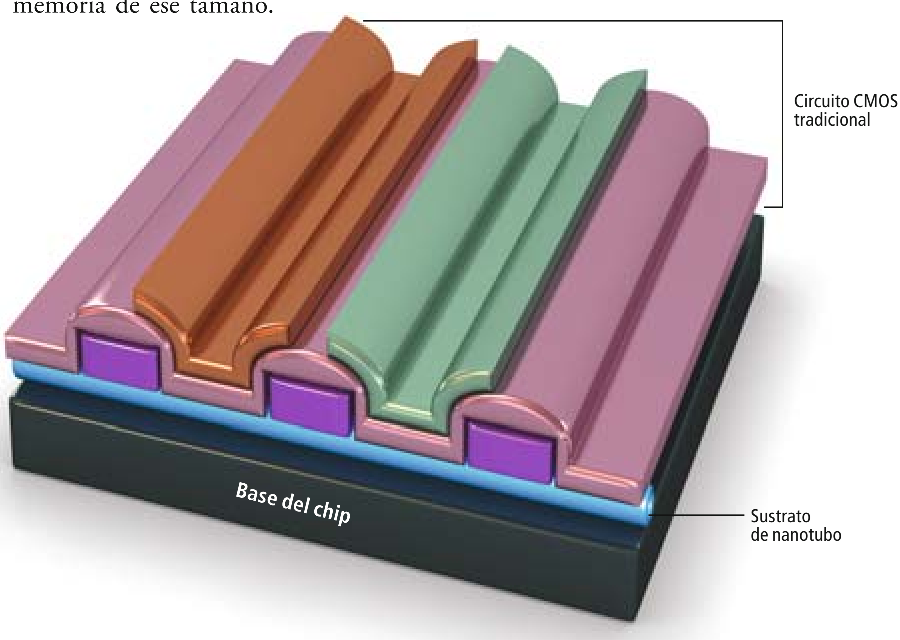
MATERIALES MAS FINOS: NANOTUBOS Y AUTOENSAMBLE

De diez años acá, muchos "enterados" ensalzan las técnicas nanométricas como solución de toda clase de problemas en medicina, energía y, por supuesto, en microcircuitos integrados. Ciertos entusiastas aducen que la industria de los semiconductores, al fabricar chips con transistores cada vez más minúsculos, ha elevado la nanotecnia al rango de disciplina.

Las mayores expectativas, no obstante, se centran en la capacidad de diseñar artesanalmente moléculas. Por ejemplo, ensamblar transistores mucho más pequeños a partir de nanotubos de carbono. De hecho, en IBM se ha fabricado un circuito tradicional CMOS (semiconductor de metal-óxido complementario) cuyo sustrato conductor es un nanotubo de carbono, en vez de silicio. Un miembro de ese equipo, Joerg Appenzeller, hoy en la Universidad de Purdue, está diseñando nuevos transistores mucho más pequeños que los CMOS, que podrían aprovechar mejor una minúscula base de nanotubo.

Ordenar moléculas, incluso átomos, puede inducir a engaño, sobre todo ante la necesidad de acoplarlos en masa durante la producción del chip. La solución podría consistir en que las moléculas se autoensamblen: una vez mezcladas se las somete al calor, a la luz o a fuerzas centrífugas, y ellas mismas se ordenan en una configuración prevista.

IBM ha demostrado la manera de realizar circuitos de memoria mediante polímeros ligados por enlaces químicos. Al revolverlas sobre la superficie de una oblea de silicio y calentarlas después, las moléculas se estiran y forman una estructura de panal cuyos poros sólo miden 20 nanómetros de ancho. Seguidamente esta configuración puede grabarse en el silicio, con lo que se obtiene un chip de memoria de ese tamaño.



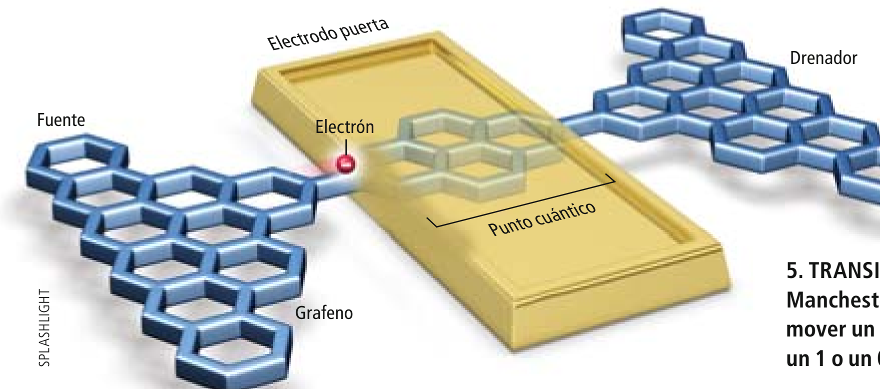
4. CIRCUITO OSCILADOR DE ANILLO construido sobre un solo nanotubo de carbono que conecta los elementos del circuito.

TRANSISTORES MAS RAPIDOS: GRAFENO ULTRAFINO

La finalidad de continuar achicando los transistores es acortar el recorrido de las señales eléctricas a través del chip, lo que a su vez eleva la velocidad de procesamiento de la información. Pero hay un determinado material a escala nanométrica —el grafeno— que por su propia estructura podría funcionar con más rapidez.

La mayoría de los microcircuitos lógicos que procesan información utilizan transistores de efecto de campo según la técnica CMOS. Imaginemos el transistor como un pastel de capas rectangulares, con una capa de aluminio (o en los últimos tiempos, de polisilicio) por encima, una capa de óxido aislante en medio y otra capa de silicio semiconductor debajo. El grafeno —forma molecular de carbono recientemente aislada— se presenta como una lámina plana de hexágonos repetitivos, semejante a una tela metálica pero con un solo átomo de espesor. Las láminas de grafeno apiladas constituyen el mineral grafito, muy familiar como mina de lápices.

En su forma cristalina pura, el grafeno conduce electrones con más rapidez que cualquier otro material a temperatura ambiente: mucho más deprisa que los transistores de efecto de campo. Los portadores de carga pierden, además, muy poca energía por dispersión o choque con átomos de la retícula, de modo que se disipa menos calor. Aunque el grafeno no se aisló como material hasta 2004 y se ha trabajado todavía poco, los expertos confían en conseguir transistores de grafeno de sólo 10 nanómetros de ancho y un átomo de altura. Acaso podría grabarse un gran número de circuitos en una sola lámina, extrafina, de grafeno.



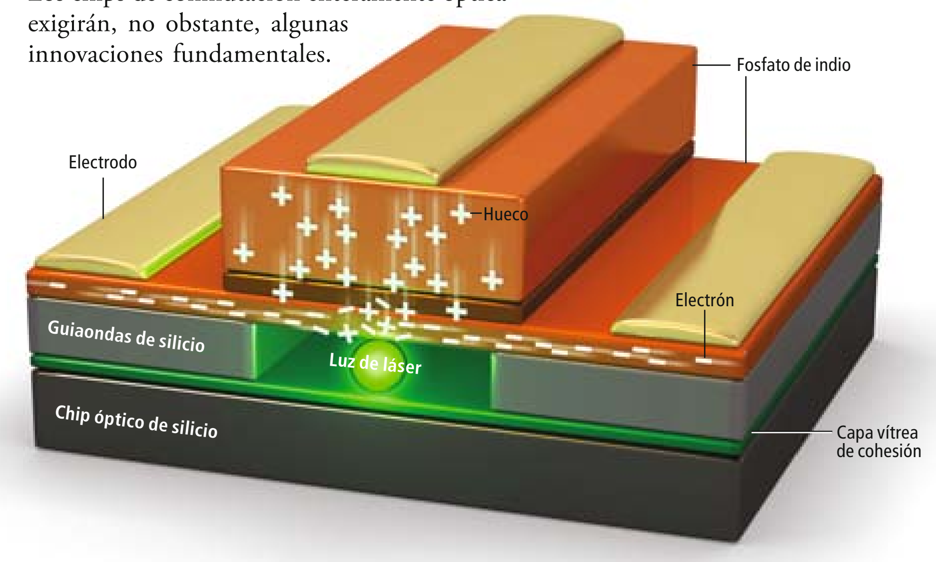
5. TRANSISTOR DE GRAFENO fabricado en la Universidad de Manchester, de un átomo de espesor. Un punto cuántico permite mover un solo electrón desde la fuente al drenador, registrando un 1 o un 0.

COMPUTACION OPTICA: A LA VELOCIDAD DE LA LUZ

Son todavía tan rudimentarias las alternativas radicales a los chips de silicio, que puede tardarse diez años en comercializarlas. Para entonces es probable que la ley de Moore ya esté fuera de lugar; por ello se investigan sistemas de computación totalmente distintos.

En la computación óptica no son los electrones sino los fotones los que transportan la información, y lo hacen mucho más deprisa, a la velocidad de la luz. El control de la luz, sin embargo, es mucho más dificultoso. Han servido de ayuda los progresos logrados en la construcción de los conmutadores ópticos instalados a lo largo de los cables de fibra óptica para telecomunicaciones. Curiosamente, uno de los trabajos más avanzados intenta crear una interconexión óptica entre los procesadores tradicionales de un chip de núcleos múltiples. De ese modo, se facilitarían los intercambios de enormes volúmenes de datos entre los núcleos que procesan información en paralelo, y se evitarían posibles congestiones en los hilos electrónicos que los unen. Esta interconexión fotónica podría aumentar la eficacia del flujo de datos: en los laboratorios de Hewlett-Packard se evalúan diseños capaces de transportar información dos órdenes de magnitud superior.

Otros grupos trabajan en interconexiones ópticas que reemplazarían los lentos hilos de cobre que ahora conectan un chip procesador con otros componentes del ordenador, tales como los chips de memoria y los controladores de DVD. En Intel y en la Universidad de California en Santa Bárbara se han construido "tuberías de datos" ópticas a partir de fosfato de indio y de silicio mediante procesos comunes de fabricación de semiconductores. Los chips de conmutación enteramente óptica exigirán, no obstante, algunas innovaciones fundamentales.



6. UN CHIP OPTICO provisto de una fuente luminosa interna controlable podrá computar con rapidez. Los electrones y huecos de las capas de fosfato de indio se recombinan en el centro para generar luz, que se difunde hacia abajo por un guiaondas de silicio y a través de una capa de vidrio.

COMPUTACION MOLECULAR: LOGICA ORGANICA

En la computación molecular, las moléculas y no los transistores son las que representan los estados lógicos "1" y "0". Cuando la molécula es biológica, como la del ADN, la computación se denomina biológica. Aclaremos que los ingenieros tal vez terminen por llamar lógica molecular, o "molectrónica", a la computación con moléculas no biológicas.

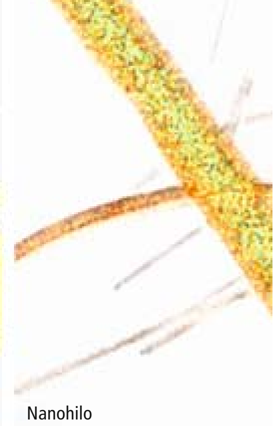
Un transistor clásico presenta (a semejanza de la letra **Y**) tres terminales: fuente, puerta y drenador. La aplicación de un voltaje a la puerta (tallo de la **Y**) provoca la circulación de electrones entre la fuente y el drenador, estableciendo un "1" o un "0". En teoría, las moléculas de forma ramificada podrían hacer que una señal circulara de manera similar. Diez años atrás, ciertos investigadores de las universidades de Yale y Rice lograron conmutadores moleculares que utilizaban el benceno como elemento básico.

Unos circuitos formados por moléculas tan diminutas podrían ser mucho más pequeños que los realizados en silicio. Será difícil, no obstante, encontrar procedimientos para fabricar circuitos complejos. Los investigadores esperan que el autoensamble ofrezca una solución. En octubre de 2009, un grupo de la Universidad de Pennsylvania transformó hilos de zinc y sulfuro de cadmio cristalino en una retícula de circuitos de metal-semiconductor, sólo por medio de reacciones químicas que provocaron el autoensamble.









7. UNOS FINOS NANOHILOS de zinc, cadmio y azufre se autoensamblan en un nanohilo más grueso y se encierran en una envoltura, apropiada para un circuito, tras ser sometidos a un impulso de medio segundo de vapor de dimetil zinc.

SPLASHLIGHT (*arriba*); CORTESIA DE RITESH AGARWAL *Universidad de Pennsylvania (abajo)*

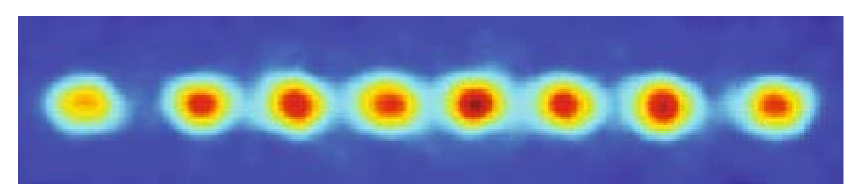
COMPUTACION CUANTICA: CEROS Y UNOS SUPERPUESTOS

Los elementos de circuito constituidos por átomos individuales, electrones o incluso fotones tendrían el mínimo tamaño posible. A esa escala, las interacciones entre los elementos se rigen por la mecánica cuántica: es decir, por las leyes que explican el comportamiento de los átomos. Los computadores cuánticos podrían ser de una densidad y rapidez increíbles, pero en realidad su fabricación y la gestión de los efectos cuánticos que originen plantean imponentes desafíos.

Ciertas características peculiares de los átomos y los electrones pueden existir en diferentes estados y formar un bit cuántico, denominado qubit. Se estudian varios métodos posibles de manipular los qubits. Uno de ellos, el llamado espintrónico, se vale de electrones cuyo momento angular magnético (espín) gira en una de dos direcciones —como una pelota que gira a un lado o a otro—, representando los estados "1" o "0".

Ambos estados pueden coexistir en un mismo electrón, lo que crea un estado cuántico singular identificado como superposición de "0" y "1". Con los estados de superposición, la información representada por una serie de electrones podría crecer exponencialmente con respecto a la que proporciona una cadena de transistores de silicio con sólo los estados binarios. En la Universidad de California en Santa Bárbara se han creado cierto número de puertas lógicas diferentes derivando electrones en cavidades grabadas en diamante.

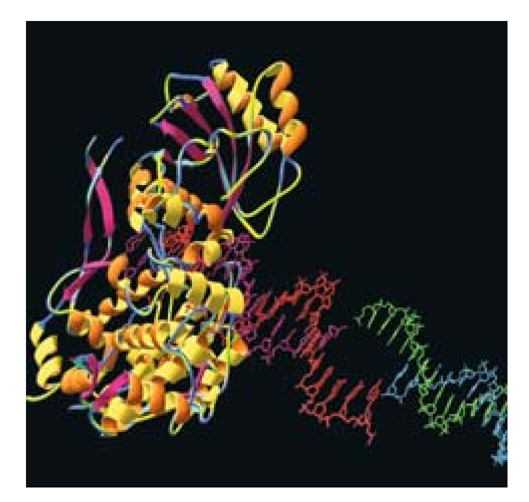
Otro método investigado por la Universidad de Maryland y el Instituto Nacional de Pesos y Medidas consiste en suspender una hilera de iones entre placas cargadas y hacer bascular por láseres la orientación magnética de cada ion (sus qubits). Una segunda opción es detectar los diferentes tipos de fotones que emite un ion, según la orientación que adopte.



8. UNA HILERA de iones de calcio suspendida dentro de una cámara de vacío puede realizar cálculos cuánticos.

Aparte de las ventajas de la superposición, los elementos cuánticos pueden formar una red intrincada. Los estados de la información están vinculados a través de numerosos qubits, lo que ofrece procedimientos muy eficaces de procesar la información y transferirla de una posición a otra.

COMPUTACION BIOLOGICA: CHIPS VIVOS



9. LA COMPUTACION es posible cuando una molécula de ADN (*derecha, verde*) entrega a moléculas informáticas de ADN (*centro, rojo*) datos que pueden ser procesados por una enzima FokI (*cinta de color*).

La computación biológica sustituye los transistores por estructuras que habitualmente se encuentran en organismos vivos. Revisten interés las moléculas de ADN y ARN, que atesoran la "programación" que gobierna las vidas de nuestras células. Lo más asombroso es que un chip no mayor que una uña humana quizás integre mil millones de transistores, pero un procesador del mismo tamaño podría contener billones de hebras de ADN. Estas hebras procesarían por separado y a la vez diferentes partes de la tarea de computación y se reunirían para configurar la solución.

Un chip biológico, además de encerrar un número de elementos varios órdenes de magnitud mayor que el chip ordinario, podría proporcionar procesamiento en paralelo a gran escala.

Los primeros circuitos biológicos procesan información mediante establecimiento y ruptura de las uniones entre hebras. Los investigadores desarrollan ahora "programas de computación genética" que vivirían y se repetirían en el interior de una célula. El reto consiste en encontrar maneras de programar colecciones de elementos biológicos para que se comporten del modo deseado. Tales computadores acaso vayan a parar al propio torrente sanguíneo en vez de al ordenador personal. Unos expertos del Instituto Weizmann de Ciencias en Rehovoth han elaborado un sencillo procesador a partir del ADN. Ahora intentan que estos componentes funcionen en el seno de una célula viva y que se comuniquen con el entorno de esa célula.

Bibliografía complementaria

A FUTURE OF INTEGRATED ELECTRONICS: MOVING OFF THE ROADMAP. Preparado por Daniel J. Radack y John C. Zolper. Número especial de *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, n.º 2; febrero de 2008.

GRAFENO. André K. Geim y Philip Kim en *Investigación y Ciencia*, págs. 54-61; junio de 2008.

MOLECULAR IMPLEMENTATION OF SIMPLE LOGIC PROGRAMS. Tom Ran et al. en *Nature Nanotechnology*, vol. 4, págs. 642-648; octubre de 2009.

CORTESIA DE R. BLATT *Instituto de Física Experimental, Universidad de Innsbruck (arriba)*; CORTESIA DE EHUD SHAPIRO *Instituto Weizmann de Ciencias (abajo)*

ENFERMEDADES TROPICALES OLVIDADAS

Los pueblos pobres sufren enfermedades crónicas que les impiden salir de la penuria. Una iniciativa global se propone romper ese círculo vicioso

PETER JAY HOTEZ

CONCEPTOS BASICOS

- Un grupo de siete enfermedades tropicales, la mayoría causadas por gusanos parásitos, afectan en el mundo a mil millones de personas sumidas en la pobreza. Rara vez resultan letales, pero llevan a una vida precaria que frena el desarrollo de los niños, reduce el rendimiento de los adultos y aumenta el riesgo de adquirir otras enfermedades.
- Por fortuna, su tratamiento es sencillo; a menudo basta un comprimido. Varias agencias y fundaciones colaboran en el suministro de los fármacos, si bien han llegado sólo al 10 por ciento de la población que los necesita.
- Los EE.UU. padecen sus propias enfermedades parasitarias olvidadas, que afectan a millones de personas en zonas rurales y urbanas desfavorecidas.

Al norte de Burkina Faso, no lejos de uno de los destinos más conocidos por los mochileros en Africa occidental, los escarpados parajes de Bandiagara en Malí, se halla la ciudad de Koumbri. Hace cinco años, el Ministerio de Sanidad de Burkina Faso inició allí, y en otros lugares, una campaña general contra los gusanos parásitos. Aboubacar, uno de los beneficiarios de la campaña, entonces un niño de ocho años, explicó al personal sanitario que se encontraba constantemente cansado, enfermo y que había orinado sangre. Bastaron unos pocos comprimidos para curarlo; volvió a jugar al fútbol, se centró en sus tareas escolares y mejoró sus notas.

El programa de Burkina Faso, que trató a más de dos millones de niños, fue un éxito. Al propio tiempo, puso de relieve la tragedia de la enfermedad en el tercer mundo. Por falta de tratamientos muy simples, cada día mil millones de personas en el mundo se levantan enfermos, lo que disminuye su rendimiento escolar y laboral.

La mayoría de los habitantes de los países ricos creen que las enfermedades tropicales se reducen a tres principales: sida (VIH), tuberculosis y malaria. Sobre ellas se concentra la ayuda económica. Sin embargo, existe un grupo de trastornos, las enfermedades tropicales olvidadas (ETO), que tienen unas repercusiones incluso mayores que las mencionadas. Quizá no causan la muerte, pero sí un debilitamiento general debido a una anemia grave, malnutrición, retraso del desarrollo intelectual y cognitivo, y ceguera. Dan lugar a deformidades penosas de las extremidades, los genitales y la piel, aumentan el riesgo de contagio por el VIH y de sufrir complicaciones durante el embarazo. Además de ser consecuencia de la pobreza, contribuyen a perpetuarla. Los niños no pueden desarrollar plenamente su potencial, ni los trabajadores adultos desplegar su plena capacidad productiva.



1. UN COMPRIMIDO de ivermectina al año es suficiente para proteger contra la oncocercosis. En Costa de Marfil, el personal sanitario ha venido luchando contra un rebrote de la enfermedad.



LOS SIETE MALDITOS

Las enfermedades tropicales olvidadas comprenden infecciones parasitarias o bacterianas comunes en las áreas más pobres.

ENFERMEDAD	CASOS	CAUSA	TRANSMISION	EFECTOS
Ascariasis	800 millones	Vermes *Ascaris* de entre 13 y 36 cm de longitud que viven en el intestino delgado (*dibujo en tamaño real*)	Suelo	■ Desnutrición y obstrucción intestinal en niños pequeños ■ Detención del crecimiento ■ Retraso cognitivo
Tricuriasis	600 millones	Vermes *Trichuris* de entre 2 y 5 cm de longitud que viven en el intestino grueso (colon)	Suelo	■ Colitis y enfermedad intestinal crónica ■ Detención del crecimiento y retraso cognitivo
Anquilostomiasis	600 millones	Vermes *Necator* de 1 cm de largo que viven en el intestino delgado	Suelo	■ Anemia ferropénica grave y desnutrición proteica ■ "Enfermedad amarilla" (anemia) ■ Detención del crecimiento y retraso en el desarrollo cognitivo e intelectual ■ Morbilidad materna y mortalidad en el embarazo
Esquistosomiasis	200 millones	Tremátodos de entre 1 y 2 cm de largo que viven en las venas de la vejiga urinaria o los intestinos	Agua corriente	■ Huevos espinosos que lesionan la vejiga urinaria, el intestino o el hígado, y causan inflamación ■ Dolor crónico, anemia, malnutrición y detención del crecimiento ■ Fibrosis hepática e intestinal (*Schistosoma mansoni* y *S. japonicum*) ■ Hematuria, nefropatía, esquistosomiasis genital femenina (*S. hematobium*)
Filariasis linfática (elefantiasis)	120 millones	Vermes *Wuchereria* (FL) de 5 a 10 cm de largo que viven en las extremidades, mamas y genitales	Mosquitos	■ Hinchazón de miembros ■ Edema de escroto ■ Deformidades corporales
Oncocercosis	30-40 millones	Vermes *Oncocerca* de 2 a 50 cm de largo que viven en nódulos subcutáneos	Mosca negra	■ Microfilariasis de piel y ojos ■ Oncocercosis cutánea ■ Ceguera
Tracoma	60-80 millones	*Chlamydia*, bacteria intracelular	Higiene pobre, moscas domésticas	■ Ceguera

Las enfermedades olvidadas no se limitan a los países subdesarrollados. Millones de estadounidenses que viven en la pobreza sufren también infecciones semejantes a las ETO. Enfermedades parasitarias como la cisticercosis, la enfermedad de Chagas, la tricomoniasis y la toxocariasis son frecuentes en nuestras ciudades del interior, en Louisiana tras el paso del Katrina, en otras partes del delta del Mississippi, en la región fronteriza con México y en los Apalaches.

Las ETO vienen azotando a la humanidad desde hace miles de años. Los historiadores han hallado descripciones detalladas de muchas de ellas en textos antiguos: la Biblia, el Talmud, los Vedas, escritos de Hipócrates y papiros egipcios. La novedad es que mecenas, industriales farmacéuticos, ministros de sanidad de países con recursos escasos o medianos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otras entidades públicas y privadas están uniendo sus esfuerzos para combatir las ETO de forma coordinada y sistemática. Durante el pasado lustro, la Fundación Bill & Melinda Gates, la Fundación Legatum para el desarrollo sostenible, con sede en Dubai, y los gobiernos de EE.UU. y del Reino Unido les han dedicado importantes sumas de dinero; por su parte, las principales firmas de la industria farmacéutica han efectuado donaciones urgentes de medicamentos. Pero la batalla no ha hecho más que empezar.

Como sanguijuelas en el intestino

Resulta difícil valorar la magnitud global del problema que entrañan las ETO. Casi todos los indigentes que viven en el Africa subsahariana, sudeste asiático e Iberoamérica padecen una o varias de esas enfermedades, que se prolongan durante años, decenios y, en ocasiones, durante toda la vida. Las siete ETO más frecuentes son las que tienen un impacto más devastador.

Tres de ellas están causadas por gusanos parásitos (helmintos) que se asientan en los intestinos. El más común, agente de la ascaridasis, afecta a 800 millones de personas; el responsable de la tricuriasis, a 600 millones. Esos helmintos roban nutrientes a los niños, lo que enlentece su crecimiento. Todavía peores efectos ejercen los anquilostomas, que atacan a 600 millones de personas. Con más de medio palmo de largo, el helminto se aloja en el intestino delgado y

El autor

Peter Jay Hotez, doctor en parasitología, dirige el departamento de microbiología, inmunología y medicina tropical en la Universidad George Washington. Es presidente del Instituto Sabin de Vacunas y cofundador de la Red Global para las Enfermedades Tropicales Olvidadas.

ISSOUF SANGO AFP/Getty Images (página anterior); CAT WILSON (gusanos)

AREAS ENDEMICAS	TRATAMIENTO	PRINCIPALES PROGRAMAS DE CONTROL
Asia, Africa, América	Albendazol, mebendazol	OMS, Niños Sin Gusanos, Deshelmintizar el Mundo
Asia, Africa, América	Albendazol, mebendazol	OMS, Niños Sin Gusanos, Deshelmintizar el Mundo
Asia, Africa, América	Albendazol, mebendazol	OMS, Niños Sin Gusanos, Deshelmintizar el Mundo, Instituto Sabin de Vacunas
Sobre todo Africa, restos en Brasil, Asia oriental y Oriente Medio	Praziquantel	Iniciativa para el Control de la Esquistosomiasis
Asia, Africa, América	Ivermectina o dietilcarbamacina y albendazol	Programa Global para la Eliminación de la Filariasis Linfática, Centro para la Ayuda Contra la Filariasis Linfática, Centro Carter
Sobre todo en Africa, menos en Iberoamérica	Ivermectina	Programa Africano para el Control de la Oncocercosis, Centro Carter, Programa Donativo Mectizan
Africa, Asia, América	Azitromizyna; estrategia SAFE: cirugía simple, antibióticos, limpieza de cara, mejoras sanitarias	Iniciativa Internacional contra el Tracoma, Centro Carter, Helen Keller International, Salvemos la Vista, Misión Cristiana Contra la Ceguera

chupa la sangre, como una sanguijuela. Al cabo de meses o años da lugar a una grave anemia ferropénica y a una desnutrición proteínica. Los niños con anemia crónica por anquilostomiasis muestran una complexión enfermiza y presentan dificultades de aprendizaje. Más de 40 millones de mujeres embarazadas están también infectadas por anquilostomas, lo que aumenta su proclividad a la malaria y hemorragias durante el parto. Sus hijos nacen con bajo peso [*véase* "Infección por gusanos intestinales", por Peter J. Hotez y David I. Pritchard; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 1995].

La siguiente ETO por orden de frecuencia es la esquistosomiasis, provocada por esquistosomas, gusanos parásitos que viven en las venas y drenan intestinos y vejiga urinaria. Más del 90 por ciento de los 200 millones de casos se dan en el Africa subsahariana; cinco millones entre Brasil y otros países. Las hembras ponen huevos dotados de espinas agudas que invaden y lesionan los órganos: intestinos e hígado, o vejiga urinaria y riñones, según la especie. Por su culpa, unos 100 millones de niños en edad escolar tienen pérdidas diarias de sangre a través de la orina y heces. La inflamación produce dolor, desnutrición, retardo del crecimiento y anemia. En las mujeres, los esquistosomas depositan sus huevos en el cérvix uterino y en la vagina, lo que causa un molesto dolor durante las relaciones sexuales y triplica el riesgo de contagio por VIH [*véase* "Esquistosomas", por Patrik Skelly; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2008].

Otras dos importantes infecciones helmínticas son la filariasis linfática (FL) y la oncocercosis. Los gusanos que causan la FL viven en las extremidades, mamas y genitales de 120 millones de personas de Asia, Africa y Haití. Dan lugar a elefantiasis, un trastorno que genera terribles deformaciones. A los adultos les impide trabajar; las mujeres que la sufren tienen dificultades para casarse o son abandonadas por su marido. La oncocercosis, o ceguera de los ríos, da lugar a una enfermedad de la piel que cursa con un prurito angustioso y origina deformidades y ceguera en la edad adulta. Casi todos los casos, entre 30 y 40 millones, ocurren en Africa; sólo algunas excepciones se registran en zonas de América y del Yemen.

2. ELEFANTIASIS (*abajo, en Haití*) y ceguera (*derecha, en Etiopia*) son dos de las consecuencias más explícitas de las enfermedades tropicales olvidadas.





ERIK S. LESSER *Redux Pictures (mujer y niño)*; MARIELLA FURRER *Redux Pictures (mujer llorando)*



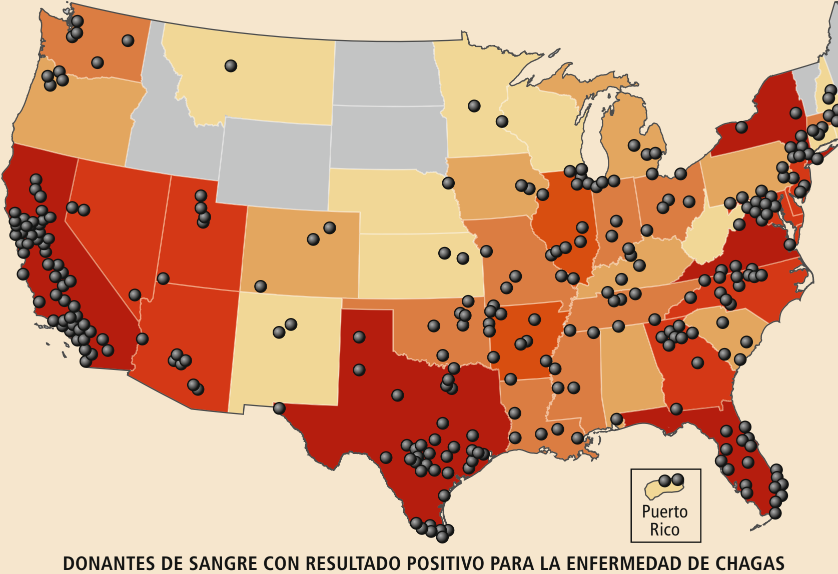
Infecciones parasitarias en EE.UU.

También los EE.UU. padecen elevados índices de enfermedades parasitarias. Esas infecciones asociadas a la pobreza guardan una estrecha semejanza con las enfermedades tropicales olvidadas (ETO); predominan en áreas muy pobres. Afectan sobre todo a negros e hispanoamericanos, puesto que un alto porcentaje de estas poblaciones viven en la miseria y en condiciones durísimas.

En el delta del Mississippi, en la Louisiana posterior al paso del Katrina y en otras áreas del sur de los EE.UU., así como en ciudades del interior, se estima que hay tres millones de negros que sufren, o sufrieron en el pasado, toxocariasis, una infección helmíntica. Los huevos del gusano se encuentran en la tierra o la arena en contacto con heces de perro; contaminan los alimentos. Una vez los huevos alcanzan el tracto digestivo, las larvas surgen y migran a los pulmones, hígado y cerebro. Consecuencias: dificultad respiratoria, convulsiones y retraso del crecimiento. Otra infección es la tricosomiasis. Se debe a un parásito protozoario que se transmite por vía sexual; causa inflamación y hemorragias en el cuello uterino. Multiplica el riesgo de adquirir otras enfermedades de transmisión sexual, entre ellas el sida.

Entre las infecciones asociadas a la pobreza que abundan entre los hispanoamericanos destacan la enfermedad de Chagas y la cisticercosis. La enfermedad de Chagas la causa un protozoo tripanosómico que se transmite por la mordedura de un insecto asesino, parecido a una cucaracha, que suele medrar en viviendas deterioradas donde corretean las ratas (*arriba*). Los parásitos producen una grave dilatación del corazón que conduce a la muerte. Se calcula que unas 300.000 personas padecen la enfermedad de Chagas en los Estados Unidos. La cisticercosis se debe a un gusano parásito. Afecta a unas 170.000 personas; es la principal causa de apoplejía en las ciudades cercanas a la frontera mexicana.

La mayoría de esas infecciones no fueron introducidas en los EE.UU. por la inmigración. Y persisten debido a la transmisión a través de la frontera estadounidense. A pesar de su elevada prevalencia, han sido poco investigadas. Las autoridades sanitarias no conocen con exactitud el número de personas infectadas ni por qué la pobreza es un factor de riesgo. Los métodos de diagnóstico y tratamiento siguen siendo rudimentarios.



LA ENFERMEDAD DE CHAGAS afecta a unas 300.000 personas en Estados Unidos. Un estudio basado en el análisis de muestras de sangre procedentes de donaciones, iniciado en 2007, demuestra que los casos se concentran en áreas con inmigrantes procedentes de Iberoamérica, que habitan en viviendas de mala calidad.

La séptima ETO en importancia es el tracoma. No se debe a un gusano parásito, sino a una infección bacteriana crónica por *Chlamydia*, un microorganismo. Afecta a entre 60 y 80 millones de personas y supone la principal infección causante de ceguera [*véase* "¿Se puede detener a las clamidias?", por David M. Ojcius, Toni Darville y Patrik M. Bavoil; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2005].

En una serie de trabajos estudié con mis colaboradores las repercusiones de esas siete enfermedades tropicales olvidadas. En conjunto, el daño sanitario global, medido por el número de años de vida sana perdidos a causa de esas infecciones, equivale al del sida o la malaria. Debido a sus efectos devastadores sobre la educación, el desarrollo infantil, los embarazos y la productividad agrícola, esas ETO constituyen una de las principales causas de pobreza. Un estudio realizado por Hoyt Bleakley, economista del desarrollo, halló que la infección por gusanos intestinales durante la infancia reducía en más del 40 por ciento el poder adquisitivo de una persona a lo largo de su vida. Otro estudio, realizado por K. D. Ramaiah y sus colaboradores en la India, estima en más de 800 millones de dólares las pérdidas anuales por reducción de la productividad como resultado de la FL. Investigaciones de otros autores arrojan resultados similares en cuanto a los efectos de la oncocercosis y el tracoma.

Curar la enfermedad con sal

La buena noticia es que esas ETO pueden tratarse y prevenirse de forma sencilla y barata. En un gran número de casos, basta con un simple comprimido. Los fármacos disponibles ofrecen una seguridad excelente; además, son proporcionados de forma gratuita por compañías multinacionales o se comercializan en forma de genéricos a un precio inferior a 10 centavos (7 céntimos de euro) por comprimido.

A principios del siglo XX, John D. Rockefeller patrocinó la administración masiva de fármacos para el control de las infecciones helmínticas en Sudamérica. Se acometió un esfuerzo similar en el Caribe. Durante los años cincuenta y sesenta, varios expertos en medicina tropical emprendieron programas para combatir otras infecciones en diversos países. Entre los implicados se hallaba Frank Hawking (padre de Stephen Hawking), que en 1967 publicó los resultados de un estudio llevado a cabo en Brasil, donde trató la FL mediante la adición de dietilcarbamacina a la sal de cocina. En 1988, Merck & Co. empezó una de las primeras campañas público-privadas para el tratamiento masivo de la ceguera de los ríos. Desde entonces se han iniciado otras colabo-

PHOTO RESEARCHERS, INC. (*insecto*); LUCY READING-IKKANDA (*mapa*)

raciones de ese tipo. Cada año se benefician de ellas decenas de millones de personas.

Gracias al suministro de medicamentos de tan bajo coste, esas empresas, en colaboración con la OMS, los ministerios de sanidad de países en vías de desarrollo y varias compañías farmacéuticas internacionales, han controlado o eliminado la ceguera de los ríos en once países africanos. Ello ha permitido a los agricultores volver a los campos cuyo cultivo habían abandonado ante los altos índices de ceguera en sus comunidades. Los programas terapéuticos han eliminado la filariasis linfática en más de una decena de países donde antes era endémica y han reducido la esquistosomiasis en más de un 80 por ciento en ocho países africanos. En términos financieros, los resultados de esos programas significan un aumento del producto interior no menor del 30 por ciento.

Un comprimido para curarlo todo

A pesar de ese gran éxito, nos queda todavía un largo camino hasta conseguir un suministro total de medicamentos para atender a los más de mil millones de personas que sufren ETO. La OMS calcula que los programas terapéuticos no llegan ni al 10 por ciento de los afectados por infecciones intestinales y esquistosomiasis.

La respuesta a ese reto pasa, en parte, por una mejora organizativa y técnica. La OMS y otras entidades han estudiado la administración simultánea de varios fármacos contra las ETO; están acelerando las gestiones para poder suministrar los medicamentos en un solo paquete ("paquete de efecto inmediato") que cuesta menos de medio dólar (0,4 euros) al año. Varios países africanos han empezado a desarrollar programas integradores que reúnen en uno varios programas centrados en una determinada ETO. Recortados así los costes y servicios sanitarios, queda margen para desarrollar otros programas, entre ellos la distribución de mosquiteras antimalaria, vacunaciones infantiles y suplementos nutricionales (vitamina A).

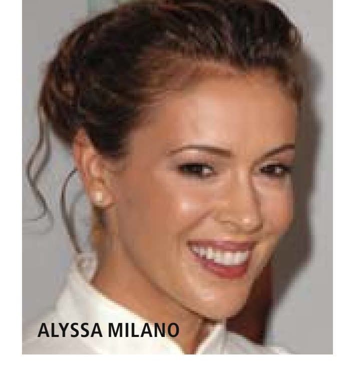
A pesar de que la integración de programas para el control de ETO ha cosechado grandes éxitos, no hemos de minusvalorar ciertas dificultades operativas: aumento del volumen de trabajo de los distribuidores de fármacos y falta de disponibilidad de ciertos medicamentos en algunos lugares. Asimismo, debe vigilarse la posible aparición de resistencias a los fármacos.

A la larga, esos programas de control de las ETO necesitarán más dinero. Los gobiernos estadounidense y británico han asignado para los próximos años más de 400 millones de dólares, destinados a la atención del tratamiento integrado de las ETO. Sin embargo, las estimaciones indican que el control de las ETO en los 56 países donde son endémicas requerirá entre 2000 y 3000 millones de dólares para los próximos de cinco a siete años. Para conseguir esos fondos, algunos de los mayores colaboradores públicos y privados constituyeron en 2006 la Red Global para las ETO, que trabaja en íntima relación con la OMS y sus oficinas regionales. Con la sede en el Instituto Sabin de Vacunas, la red recibe subvenciones de la fundación Gates y otros patrocinadores privados; respalda programas terapéuticos contra las ETO en todo el mundo mediante apoyo legal, político y logístico.

El Instituto Sabin de Vacunas ha puesto también en marcha una asociación internacional para el desarrollo de productos, centrado en la consecución de vacunas contra la anquilostomiasis y la esquistosomiasis. Se han iniciado ya los ensayos clínicos de una vacuna contra la anquilostomiasis. Un gran avance, si nos percatamos de que uno de los fármacos utilizados para tratamientos masivos de esta enfermedad registra un índice de fracaso notable debido a la aparición de resistencias por parte del parásito.

El Instituto Sabin trabaja en colaboración con una serie de institutos de investigación y desarrollo brasileños y con el gobierno de Brasil. En Brasil se registra el mayor número de casos de esas helmintiasis en América, enfermedades que llegaron allí procedentes de áreas endémicas de Africa occidental, a través del tráfico de esclavos; constituyen, pues, un vestigio viviente de la esclavitud.

Si la lucha contra las ETO es tan obvia y tan barata, ¿por qué ha tardado tanto en aplicarse de forma sistemática? La respuesta no es sencilla. En los Objetivos de Desarrollo del Milenio para la erradicación de la pobreza, trazados en 2000, las ETO fueron relegadas a la categoría de "otras enfermedades", clasificación que no ayuda a que la gente cobre conciencia de la importancia de las mismas. Por otra parte, las ETO debilitan más que matan. No son, pues, prioritarias para los países donantes; éstos prefieren centrarse en el sida, la tuberculosis y la malaria, trastornos con un curso fatal si no se tratan. Otros programas de ayuda al desarrollo, que ven las ETO como síntomas más que enfermedades, prefieren abordar lo que consideran problemas subyacentes: bajo nivel sanitario, falta de acceso al agua potable y pobreza. Objetivos loables, sin la menor duda. Pero la realidad es que los fármacos contra las ETO suponen el método más rentable desde el punto de vista coste-efectividad para mejorar la salud, la educación y el bienestar de las zonas más empobrecidas del planeta.



ALYSSA MILANO

COMO AYUDAR

Aunque las enfermedades tropicales olvidadas representan un reto enorme, el módico precio de su tratamiento hace que también las ayudas individuales puedan contribuir a su erradicación. Desde Bill Clinton a la actriz Alyssa Milano, numerosas personas célebres han dedicado tiempo y esfuerzos a ayudar a la Red Global contra esas enfermedades.



STEVE GRANITZ *Getty Images (Milano)*; DON FARRALL *Getty Images (monedas)*

Bibliografía complementaria

CONTROL OF BANCROFTIAN FILARIASIS BY COOKING SALT MEDICATED WITH DIETHYLCARBAMAZINE. Frank Hawking y Ruy João Marques en *Bulletin of the World Health Organization*, vol. 37, n.º 3, págs. 405-414; 1967.

FORGOTTEN PEOPLE, FORGOTTEN DISEASES: THE NEGLECTED TROPICAL DISEASES AND THEIR IMPACT ON GLOBAL HEALTH AND DEVELOPMENT. Peter J. Hotez. ASM Press, 2008.

RESCUING THE BOTTOM BILLION THROUGH CONTROL OF NEGLECTED TROPICAL DISEASES. Peter J. Hotez et al. en *Lancet*, vol. 373, n.º 9674, págs. 1570-1575, mayo 2009.

El enigma de Osborne Reynolds

Aunque se sigue desconociendo por qué un fluido conducido por una tubería se vuelve turbulento, se ha dado un paso importante hacia la resolución del problema, formulado hace ya más de 125 años

Alvaro Meseguer y Fernando Mellibovsky

En 1883, Osborne Reynolds, matemático y profesor de ingeniería de la Universidad de Manchester, dio a conocer su estudio experimental y teórico de la transición a la turbulencia en fluidos conducidos por el interior de tuberías. Aunque su artículo supuso un inmenso salto cualitativo, más de siglo y cuarto después todavía se desconocen los mecanismos físicos del fenómeno. Algunas de las cuestiones fundamentales sobre la transición han empezado a dilucidarse hace apenas 4 o 5 años, gracias a la colaboración de diferentes grupos de investigación alemanes, británicos y españoles. De ello vamos a hablar en este artículo.

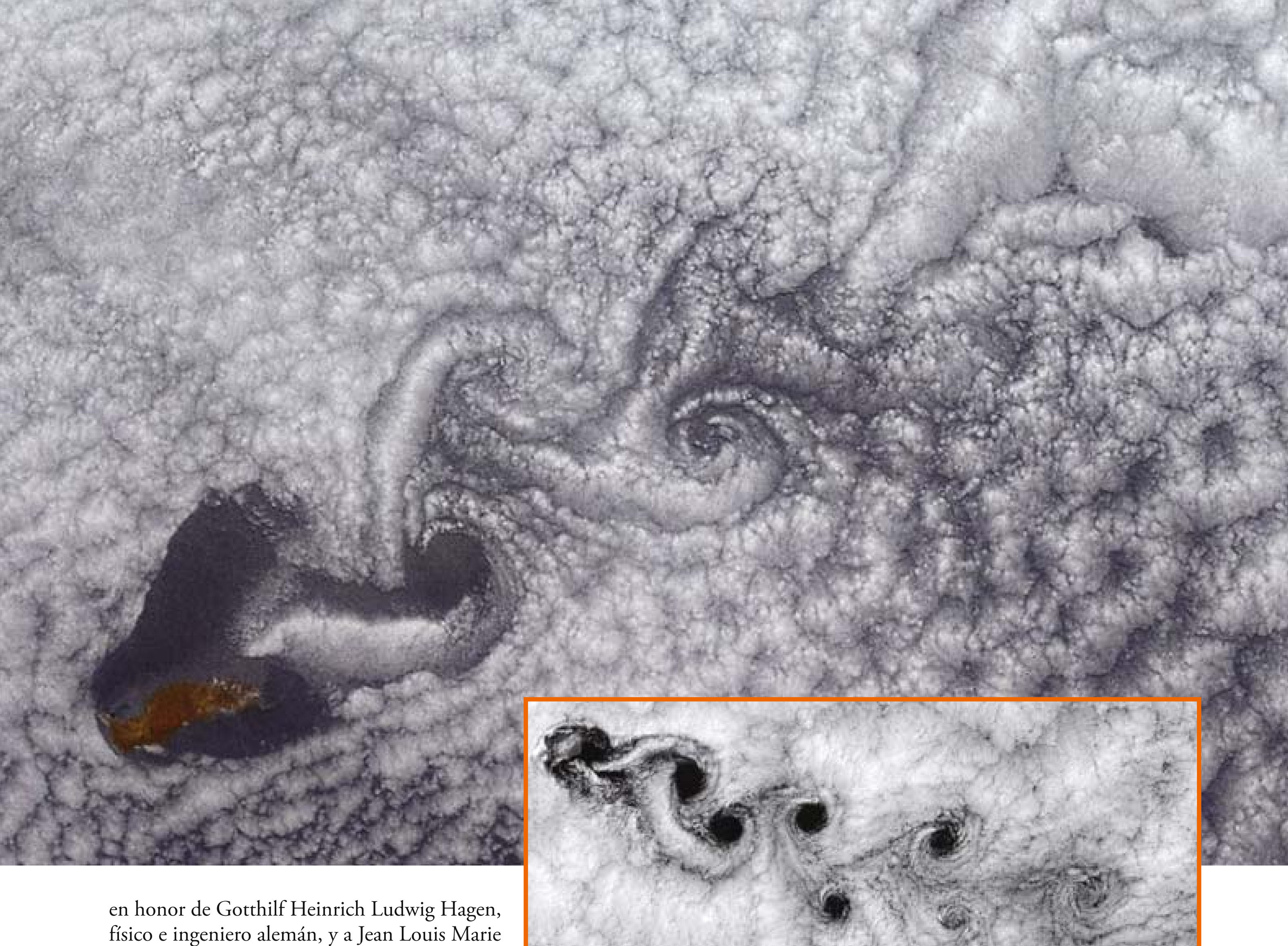
La turbulencia es uno de los problemas más complejos de la física clásica. Determinar las causas por las cuales el movimiento de un fluido (agua o aire, por ejemplo) se torna turbulento e impredecible es de vital importancia en ingeniería aeronáutica o en meteorología. Un ejemplo familiar de las consecuencias de la turbulencia lo encontramos en los aviones. Dependiendo de las condiciones climatológicas, el fuerte viento que rodea el fuselaje del avión se vuelve errático y violento.

Otro ejemplo cotidiano de transición a la turbulencia nos lo dan los grifos domésticos. Si los abrimos con cuidado, para que el caudal de salida sea pequeño, el chorro de agua tendrá un perfil suave y estacionario. Es decir, si filmáramos el chorro y después reprodujéramos la película, no podríamos distinguir si el vídeo está parado o en marcha. Es lo que caracteriza a un flujo *estacionario laminar:* el agua fluye por la tubería hasta el grifo, pero siempre de la misma forma. Sin embargo, si vamos abriendo poco a poco el grifo para que aumente el caudal podremos observar que el chorro de salida empieza a experimentar oscilaciones erráticas e impredecibles. En algunos casos saldrá a borbotones, sin orden alguno, y la tubería vibrará o hará ruido. Ese flujo del chorro es claramente *no estacionario* y *turbulento:* el agua fluye por la tubería de formas diferentes, impredecibles, en el transcurso del tiempo.

¿Cuál es el caudal máximo del grifo en condiciones de laminaridad? Es decir, ¿hasta dónde podemos abrir el grifo sin que el chorro se vuelva turbulento? Este es el que hoy llamamos *problema de Reynolds*. A principios de los años ochenta del siglo XIX, Reynolds realizó varios experimentos con tuberías de sección circular de diferentes diámetros. Las sometió a la misma presión e hizo pasar agua corriente por ellas. Ya sabía que, bajo condiciones de laminaridad, la velocidad del agua era máxima en el centro de la tubería y nula en las paredes, debido a la viscosidad del fluido. En concreto, la velocidad del agua a una distancia r del centro de la tubería de radio a tiene un perfil parabólico (es proporcional al binomio $a^2 - r^2$). A este régimen se le llama flujo de *Hagen-Poiseuille*,

CONCEPTOS BASICOS

- Cuando se va aumentando el caudal que corre por una tubería, llega un momento en que el fluido se vuelve turbulento.
- Las ecuaciones de Navier-Stokes rigen el movimiento de los fluidos. Sin embargo, no se ha podido aún explicar con ellas el tránsito a la turbulencia en una cañería ni la condición numérica para su surgimiento, descubierta por Osborne Reynolds en 1883.
- En los últimos años, nuevos procedimientos de cálculo se están acercando a la resolución del problema.



en honor de Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen, físico e ingeniero alemán, y a Jean Louis Marie Poiseuille, fisiólogo francés que estudió el flujo de la sangre en las arterias humanas.

Reynolds medía la velocidad máxima (*U*) del agua en el centro de una tubería de vidrio transparente y aumentaba paulatinamente el caudal (y con ello la velocidad máxima) hasta que el fluido se volvía turbulento. Para detectar la transición a la turbulencia, añadía un colorante o *trazador* en la entrada de la tubería que permitía visualizar la trayectoria de las partículas fluidas. Obtuvo que, para tuberías de diferentes radios, la velocidad de transición en el centro era también diferente. Su genialidad consistió en observar que el producto de la velocidad de transición por el radio de la tubería era aproximadamente el mismo en todos los casos. Por decirlo de otro modo: si una tubería de radio *a* presentaba transición a una cierta velocidad máxima *U* en el centro, una segunda tubería de radio *a*/2 presentaría la transición al doble de velocidad, 2*U*.

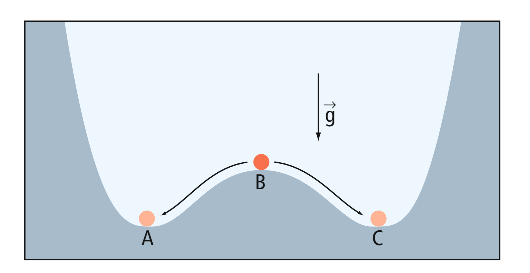
Los experimentos posteriores realizados con diferentes fluidos demostraron que la *viscosidad cinemática* ν del fluido utilizado desempeñaba, por su parte, una importante función en la transición. La viscosidad de un fluido constituye una propiedad microscópica que mide la resistencia a fluir que el fluido presenta cuando se le aplica una fuerza de cizalla, una fuerza tangencial que desplaza unas superficies o capas con respecto a otras y hace que el fluido fluya a una velocidad tanto mayor —con respecto a la orientación de la fuerza— cuanto más cerca se encuentre de la superficie en que se aplique la fuerza. (La viscosidad dinámica mide la proporcionalidad entre el valor de esa fuerza por unidad de superficie, por una parte, y el cambio de la velocidad del fluido con la distancia a la superficie de aplicación, por la otra; la viscosidad dinámica dividida por la densidad del fluido define la viscosidad cinemática.) Así, un lubricante industrial es más viscoso que el agua, y esta, a su vez, más que el aire.

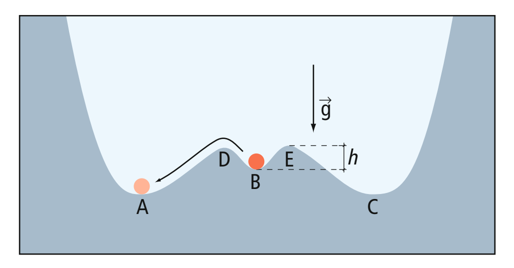
Finalmente, Reynolds concluyó que la transición a la turbulencia sucedía cuando el resultado de multiplicar la velocidad máxima en el centro, *U,* por el radio de la tubería, *a,* y dividir por la viscosidad cinemática del fluido, ν, adoptaba aproximadamente cierto

1. ESTAS IMAGENES DE SATELITE, tomadas el 15 de septiembre de 1999 (*la del recuadro*) y el 11 de junio de 2000, muestran la estructura vorticial turbulenta que unos flujos atmosféricos en zonas nubosas adoptan tras rodear, respectivamente, la isla de Guadalupe y la de Juan Fernández (*recuadro*), ambas del océano Pacífico. Las nubes siguen el *flujo de von Kárman*, una de las soluciones de la ecuación de Navier-Stokes para una corriente fluida que sortea un obstáculo que está sumergido en ella. Para hacerse una idea de la magnitud, téngase en cuenta que la isla de Guadalupe tiene unos 35 kilómetros de largo.

NASA/GSFC/JPL, MISR TEAM (*vórtices en Isla Guadalupe*); BOB CAHALAN, NASA GSFC (*Isla de Juan Fernández*)

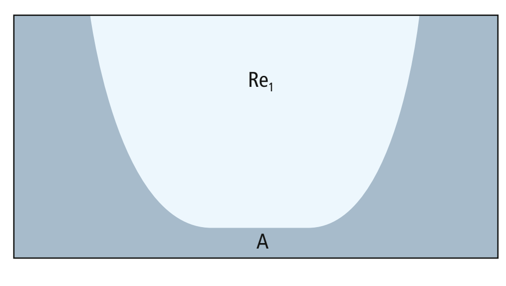
2. LA BOLITA SE ENCUENTRA EN UN PUNTO LINEALMENTE INESTABLE (*arriba*): cualquier perturbación desestabilizará su posición haciéndola caer hacia A o C. *Abajo*, la bolita se encuentra ahora en el punto linealmente estable B, pero una pequeña perturbación con suficiente amplitud puede desestabilizarla y hacer que abandone su posición.

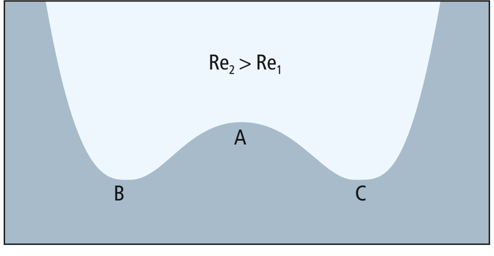


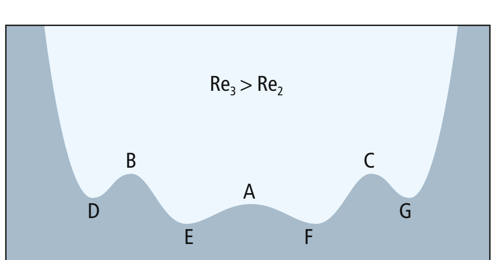


valor numérico, el número de Reynolds *Re*, un número adimensional, es decir, un puro número, sin dimensiones físicas (Re = aU/ν). Lo que controla la transición, pues, *no* es el valor absoluto de los parámetros del problema (*a*, *U* o ν), sino una relación entre ellos. A esto se le denomina ley de la *similitud dinámica*, que permite a los ingenieros estudiar en túneles de viento la aerodinámica de prototipos de fuselaje de aviones a escala reducida.

Volvamos a nuestra pregunta sobre el caudal máximo que puede tener el grifo antes de que aparezca la turbulencia. Dado que acabamos de ver que ni la velocidad o la viscosidad del agua, ni el diámetro de la tubería son relevantes por sí solos a la hora de predecir la transición, sino en combinación adimensional, nuestra pregunta quedaría formulada de la siguiente manera: ¿para qué valor del numero de Reynolds de una tubería cilíndrica se presenta la turbulencia? Ese valor umbral suele recibir el nombre de *número de Reynolds crítico,* o Re_c.







3. EN UNA TRANSICION CLASICA, a medida que se aumenta el número de Reynolds se inestabilizan las soluciones que eran linealmente estables, lo que conduce a nuevas soluciones estables. Estas últimas, a su vez, sufren inestabilidades cuando seguimos aumentando el número de Reynolds, con lo que se crean flujos más complejos y, finalmente, turbulentos. El problema de Reynolds no sigue esta pauta.

ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY

Estabilidad lineal

El movimiento de un fluido viscoso incompresible viene descrito por leyes físicas que ya fueron formuladas en el siglo XIX por Claude Louis Navier y George Gabriel Stokes. Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones matemáticamente complejas que relacionan variaciones espaciotemporales de la velocidad y presión del fluido con las fuerzas externas que actúan sobre éste y con las propiedades cinemáticas de las paredes que lo contienen. Por lo tanto, conocidas las fuerzas externas y condiciones de contorno, la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes nos proporciona la velocidad y la presión exactas del fluido en cualquier punto y para cualquier instante de tiempo. Se trata de ecuaciones no lineales, que admiten múltiples soluciones: un fluido sometido a condiciones y fuerzas externas específicas puede exhibir muchos flujos distintos.

Los flujos que observamos en la naturaleza —el de una tubería o el remolino que se forma en el desagüe de una bañera— son soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes. Más aún, son *soluciones estables*, robustas frente a perturbaciones externas. Eso no quiere decir que las ecuaciones de Navier-Stokes no admitan otras soluciones, por ejemplo en la tubería. Con una gran probabilidad existirán otras muchas, pero no se manifestarán porque son inestables.

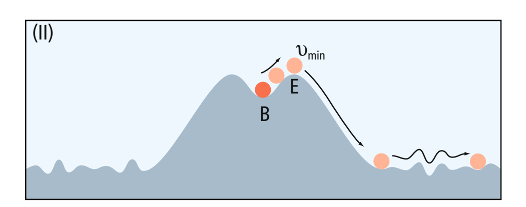
Un ejemplo de lo que acabamos de describir es la figura 1, en la que se ve el flujo resultante de una zona nubosa arrastrada por corrientes atmosféricas que rodean una isla. La velocidad y la presión del viento siguen una pauta ordenada, gobernada por una de las posibles soluciones estables de las ecuaciones de Navier-Stokes para esas condiciones climáticas. La figura 1 ilustra uno de los flujos clásicos de la dinámica de fluidos, denominado coloquialmente *la calle de los vórtices de Von Kárman*, en honor del físico de origen húngaro Theodore von Kármán. Cuando sumergimos un obstáculo en un fluido en movimiento, el fluido lo sortea y, al dejarlo atrás, forma, por encima de cierto umbral de velocidad, vórtices o remolinos.

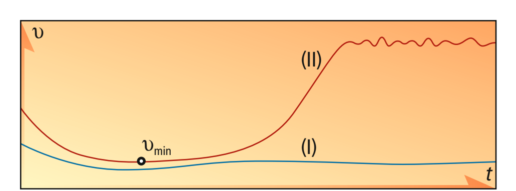
Hagamos una comparación. Imaginemos una bolita, de masa cualquiera, que se encuentra sometida a la acción de la gravedad *g* y descansa sobre el perfil de una montaña,

tal y como se ilustra en la figura 2 (*arriba*). Salvando las diferencias, determinar la posición de la bolita en cualquier instante de tiempo sería el equivalente a encontrar una solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, en este caso de las ecuaciones de la mecánica de Newton. Asimismo, una posición de equilibrio o estacionaria (equivalente al chorro laminar del grifo descrito en la introducción) de la bolita es una posible solución al problema. Claramente, hay tres soluciones estacionarias: si dejamos la bolita justo en A, B o en C, permanecerá indefinidamente en cualquiera de esos tres puntos. Sin embargo, cualquier perturbación, por pequeñísima que sea, hará que abandone B, dado que es un punto *linealmente inestable*. El calificativo *lineal* debe aquí entenderse de forma rigurosa, con el sentido de que no importa el tamaño de la perturbación: sea cual sea, desestabilizará la posición de la bolita. También suele declararse que B es un punto inestable ante perturbaciones *infinitesimales*. Por lo general, nunca observaremos a la bolita en B, sino en A o en C.

Consideremos un segundo caso, ilustrado en la figura 2 (*abajo*). El perfil de la montaña presenta cinco puntos estacionarios. El punto B es ahora linealmente estable, debido a la concavidad de la montaña en esa zona. Los puntos A y C siguen siendo linealmente estables. La diferencia estriba en que, en la nueva situación, han aparecido dos pequeñas protuberancias próximas al punto B que acotan débilmente la posición de equilibrio de la bolita. Esas dos protuberancias corresponden a los puntos de equilibrio linealmente inestable D y E; y, en cierto modo, a ellos se debe que B sea linealmente estable. En este caso, una perturbación infinitesimal *no* apartará la bolita de su posición B. Para desestabilizar la bolita habrá que introducir una perturbación *finita* que le permita subir esa pequeña diferencia de altura *h* que le separa de D o E. Se suele decir entonces que B es una solución de equilibrio inestable frente a perturbaciones de *amplitud finita*.

En este último caso descrito, los puntos de equilibrio A, B, C, D y E constituyen soluciones del problema de Newton. Con ellos hemos querido representar tres tipos de flujos o soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes para un mismo perfil o condiciones externas de fuerza: (i) soluciones linealmente estables (A-C), (ii) soluciones linealmente inestables (D-E) y (iii) soluciones linealmente estables, pero inestables frente a pequeñas perturbaciones de amplitud finita (B). Más adelante veremos la relevancia que tienen las soluciones del tipo D y E en la estabilidad del flujo de Hagen-Poiseuille.



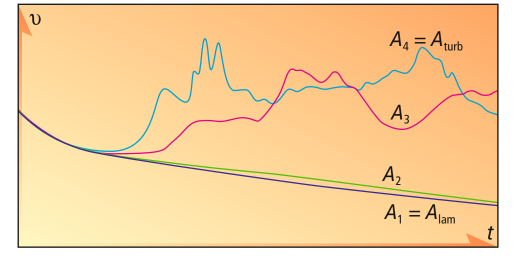


4. LA BOLITA NO TIENE EN EL CASO I suficiente inercia para sobrepasar E. En el caso II, la amplitud de la perturbación basta para que la bolita pueda saltar la barrera y se desacelere transitoriamente antes de empezar el escape. La gráfica inferior representa la velocidad de la bolita en los casos arriba ilustrados.

Estabilidad del flujo de Hagen-Poiseuille

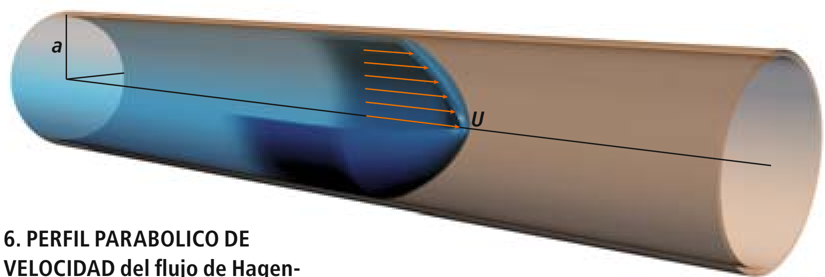
Los experimentos iniciales realizados por Reynolds proporcionaron una primera estimación del valor crítico de *Re* ~ 13.000. Desde finales del siglo XIX se han realizado multitud de experimentos sobre la misma cuestión, con resultados desalentadores. Los experimentos realizados en tuberías suficientemente largas, en condiciones de extrema precisión (evitando el ruido externo y controlando la temperatura del fluido), han podido mantener la laminaridad hasta números de Reynolds cercanos a *Re* ~ 20.000. Otros trabajos experimentales han estudiado los efectos de perturbaciones de gran amplitud (con la introducción de ruido externo) y han podido así reducir el número de Reynolds hasta el orden de *Re* ~ 2000. En resumen, la transición en el Problema de Reynolds es muy sensible a la magnitud de las perturbaciones externas, susceptibilidad que aumenta con el número de Reynolds.

Analizar la estabilidad lineal de una solución de la ecuación de Navier-Stokes no es tan fácil como en el ejemplo de la bolita. En algunos casos particulares, existen métodos matemáticos que nos permiten determinar el número de Reynolds crítico para el cual determinado flujo se vuelve inestable. Sin embargo,



5. VELOCIDAD DE LA PERTURBACION añadida al fluido, υ, en función del tiempo, para diferentes amplitudes iniciales de dicha perturbación. Los datos proceden de una simulación directa de las ecuaciones de Navier-Stokes para una tubería.

ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY



6. PERFIL PARABOLICO DE VELOCIDAD del flujo de Hagen-Poiseuille en una tubería de radio *a*. Las flechas indican la dirección, sentido y magnitud de la velocidad del fluido.

7. PERFIL PARABOLICO DE VELOCIDAD AXIAL de Hagen-Poiseuille (*izquierda*) seccionado en zonas en las que la velocidad axial es del 75 % y 99 % de la velocidad máxima en el eje. A la derecha se ve la proyección bidimensional de la distribución de velocidades (zonas rápidas en rojo y lentas en azul).

0,75 U
0,99 U
U

las ecuaciones que gobiernan la estabilidad de un flujo de Navier-Stokes, sumamente complejas, deben resolverse con métodos numéricos de alta precisión.

La teoría de la estabilidad hidrodinámica estudia las causas que provocan la desestabilización de ciertos flujos de la naturaleza. El aumento de la capacidad computacional de las últimas décadas le ha sido de mucha ayuda. Hoy en día, puede estudiarse en muchos casos la estabilidad de un flujo con un ordenador doméstico y adecuados métodos numéricos. Así, la teoría de la estabilidad hidrodinámica se ha aplicado con éxito en diferentes áreas de la dinámica de fluidos; por ejemplo, en el estudio de fluidos en rotación o sometidos a flujo de calor. Sin embargo, en el problema de Reynolds, todas las teorías hasta ahora propuestas han fracasado a la hora de dar una explicación convincente sobre las causas de la transición a la turbulencia del flujo de Hagen-Poiseuille.

La primera fase del estudio de estabilidad de una solución de la ecuación de Navier-Stokes consiste en determinar si el flujo es linealmente estable. Todos los cálculos realizados hasta la fecha indican que, con gran probabilidad, el flujo de Hagen-Poiseuille es *linealmente estable*, sea cual sea el número de Reynolds. La paradoja es que, pese a su estabilidad lineal, el flujo en la tubería se inestabiliza de forma violenta y transita rápidamente al régimen turbulento. Diferentes estudios se aprestaron a defender que la inestabilidad está causada por las imperfecciones de la tubería, por la rugosidad de las paredes o incluso por fenómenos de reajuste del flujo en la entrada o en la salida del tubo.

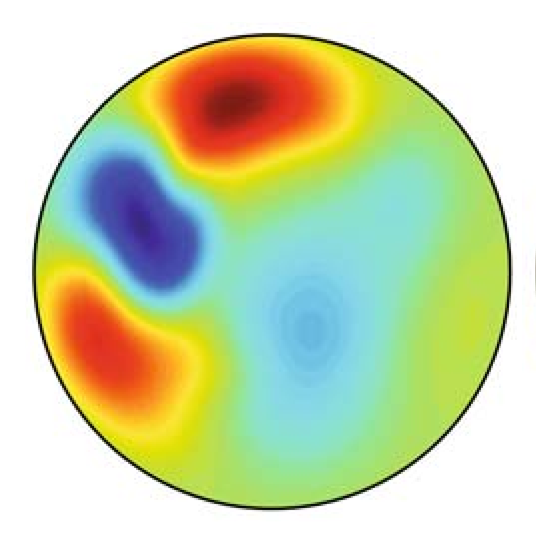
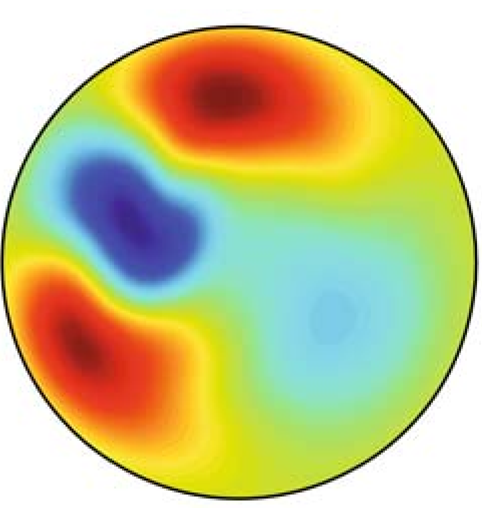
Pero todos esos argumentos se desmoronan cuando entra en acción la simulación numérica. La potencia de cálculo computacional actual permite aproximarse a las soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes con mucha precisión. En estas simulaciones, la geometría de la tubería no tiene imperfecciones, ni hay que reajustar el flujo ni en la entrada ni en la salida, dado que se le impone un valor numérico en la una y en la otra. Aun así, el flujo de Hagen-Poiseuille simulado computacionalmente se vuelve turbulento y, cuando se introducen en la simulación perturbaciones lo bastante grandes, la cota inferior del valor crítico del número de Reynolds se acerca en un grado asombroso a un valor de alrededor de 2000, que concuerda con las cotas experimentales.

El problema de Reynolds contrasta con otros problemas clásicos de la estabilidad hidrodinámica, donde la transición a la turbulencia se realiza mediante una sucesión de inestabilidades lineales. Por ejemplo, el aumento del número de Reynolds en flujos que rotan o en los que hay convección térmica causa inestabilidad lineal en esos flujos para cierto valor crítico Re_c. Por lo general, esa inestabilidad no genera turbulencia, sino otro flujo secundario (o flujos) linealmente estable. Si seguimos aumentando el número de Reynolds, ese flujo secundario sufrirá, a su vez, una inestabilidad lineal y se crearán flujos terciarios cada vez más complejos, aunque laminares. El aumento paulatino del número de Reynolds acabará llevando, pues, a soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes de complejidad creciente y, en última instancia, turbulentas.

Un ejemplo ilustrativo de ese tipo de transición lo tenemos en la figura 3. Para determinado número de Reynolds Re_1, la única solución estable es el punto A (*arriba*). Al aumentar el número de Reynolds hasta un valor Re_2, la montaña cambia su perfil de forma que A pasa a ser linealmente inestable y aparecen dos nuevos puntos estables, B y C, hacia los cuales tenderá la dinámica del sistema (*centro*). B y C representan los nuevos flujos laminares secundarios estables. El proceso se repite al seguir aumentando *Re* hasta un valor Re_3; se inestabilizan entonces las soluciones secundarias B y C y se crean nuevas soluciones laminares linealmente estables más complejas: D, E, F y G.

El flujo de Hagen-Poiseuille (linealmente estable) se inestabiliza y convierte en flujo

ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY

8. DISTRIBUCION DE VELOCIDADES AXIALES en un estado de relajación (*izquierda*) para un número de Reynolds *Re* de 2875. A la derecha, solución de Navier-Stokes encontrada utilizando el método de Newton-Krylov y tomando como guía inicial el estado transitorio de la izquierda. (Las zonas rojas tienen una velocidad muy alta; las azules, muy baja.)

ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY

turbulento de forma directa, sin pasar por estadios intermedios laminares secundarios. Dicho de otro modo, la transición del problema de Reynolds *no* sigue lo descrito en la figura 3, sino que vendría representada por el gráfico inferior de la figura 2 para números de Reynolds suficientemente grandes. El punto B en el gráfico inferior de la figura 2 representaría el flujo de Hagen-Poiseuille, linealmente estable, y los puntos A y C, estados turbulentos no laminares hacia los cuales escapa el flujo siempre que la perturbación sea del tamaño adecuado.

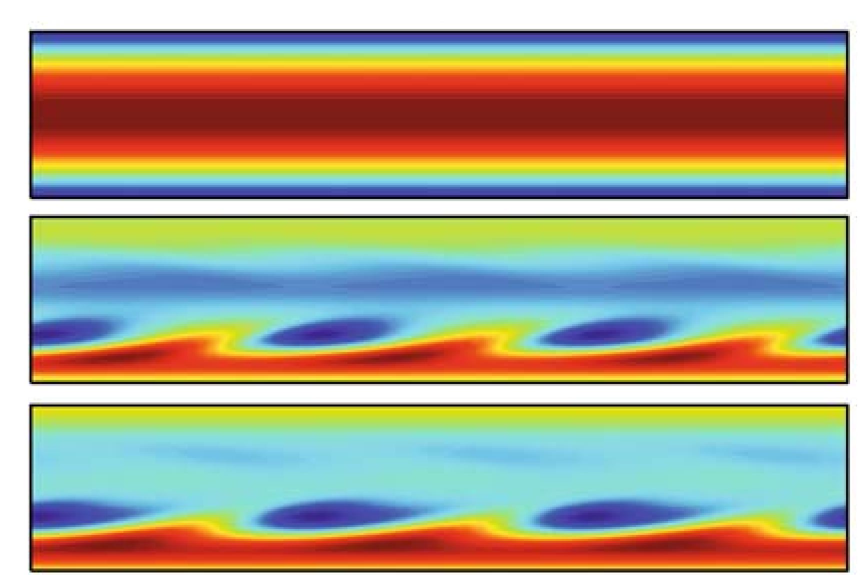
Obviamente, lo que condiciona la estabilidad del flujo de Hagen-Poiseuille es la presencia de las soluciones inestables D y E de la figura 2. Esas soluciones delimitan la *cuenca de atracción* del flujo de Hagen-Poiseuille, es decir, la zona por la cual podría moverse la bolita sin caer en los pozos turbulentos A o C. Por otro lado, que el flujo de Hagen-Poiseuille resulte más susceptible de desestabilizarse cuanto mayor sea el número de Reynolds vendría explicado por la altura *h* de la barrera formada por las dos soluciones inestables D y E. Podemos imaginar que *h* se va haciendo cada vez más pequeño (sin llegar nunca a ser cero) a medida que aumentamos el número de Reynolds, de modo que la magnitud que debe tener una perturbación para expulsar la bolita del pequeño pozo de equilibrio será cada vez menor.

Los estados umbral

Las soluciones de equilibrio inestable D y E del gráfico inferior de la figura 2 son las responsables de la estabilidad parcial del punto B. Este argumento ha servido de hipótesis de trabajo para proporcionar una posible explicación de la transición en el problema de Reynolds. De validarse la hipótesis, deberían existir soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes que representasen a esos puntos como responsables de la transición. Ahora bien, tales soluciones o flujos son inestables y, por lo tanto, no se observarán nunca en los experimentos. Todos los estudios experimentales realizados hasta el momento no han podido detectar trazas residuales de semejantes soluciones. Ahí reside una de las razones de que el problema de Reynolds se haya mantenido estancado varios decenios.

Mas, desde hace 4 o 5 años, el problema ha tomado un rumbo diferente gracias al aumento de la capacidad de cálculo de los procesadores y el trabajo de un pequeño grupo de científicos especializados en sistemas dinámicos y dinámica de fluidos computacional. La teoría de sistemas dinámicos, una disciplina matemática, estudia las propiedades cualitativas de estabilidad de sistemas complejos, ya sean físicos, biológicos o económicos. Para ello reduce el problema a su mínima expresión mediante la generalización de la dinámica del sistema, con independencia de la naturaleza de éste. Por su parte, la dinámica de fluidos computacional estudia la manera de simular flujos reales mediante ordenadores de gran potencia.

La simulación numérica de alta precisión de un flujo de Navier-Stokes permite obtener información cuantitativa y cualitativa sobre la dinámica del flujo. Los algoritmos de simulación se aproximan a las soluciones en el espacio y el tiempo. Es decir, nos proporcionan buenas aproximaciones de la velocidad y presión del fluido en cualquier punto de éste y para instantes de tiempo arbitrarios. Sólo hay una limitación: la evolución temporal de esos algoritmos tiene una dirección privilegiada, *hacia delante*. Sólo podemos simular el *futuro* del movimiento del fluido, pero en ningún caso el *pasado*. La razón de que no podamos ir marcha atrás en el tiempo, compleja de explicar, se saldría del marco de este artículo. En cualquier caso, esa limitación acaba siendo



9. CORTE DIAMETRAL-LONGITUDINAL de distribuciones de la velocidad axial (el fluido se mueve de izquierda a derecha). Arriba: flujo básico de Hagen-Poiseuille. Centro: estado de relajación correspondiente a la imagen izquierda de la figura 8. Abajo: estado determinado por el correspondiente a la imagen derecha de la figura 8.

la misma que tienen los experimentales que trabajan con fluidos.

La evolución temporal de un flujo de Navier-Stokes, realizada experimental o computacionalmente, nunca va a detenerse en soluciones inestables del tipo D o E de la figura 2. Esas soluciones son *repulsoras* y es difícil acercarse a ellas. Ahora bien, la dinámica de flujos computacional ha desarrollado técnicas para determinar soluciones de Navier-Stokes inestables, los *métodos de Newton-Krylov* (MNK), que permiten aproximarse a la solución sin hacer uso de la evolución temporal. Los MNK reducen el problema dinámico a un problema puramente algebraico, en el que desaparece la dependencia temporal. El algoritmo MNK tendrá éxito siempre que nos encontremos cerca de esa solución inestable. Por lo tanto, la primera fase de nuestra búsqueda de soluciones tipo D o E consistirá en aproximarnos a ellas temporalmente todo lo que podamos.

Acercarse a la frontera

Volvamos al ejemplo de la bolita del gráfico inferior de la figura 2. Para ello, hemos representado en la figura 4 el pozo linealmente estable de nuevo, pero en este caso sólo hemos indicado el punto B de equilibrio linealmente estable y el punto E de barrera inestable; el punto C ahora queda sustituido por un valle de perfil irregular, que representa el estado turbulento. Si impartiésemos una pequeña percusión lateral a la bolita en su posición inicial B, la bolita se separaría de su punto de partida B para después volver a él (*figura 4, arriba*). Si repitiésemos el experimento aumentando el impulso inicial de la percusión, la bolita alcanzaría alturas mayores y se aproximaría más a E. Finalmente, una percusión con suficiente energía haría que la bolita alcanzase la altura del punto E, pero por regla general no se quedaría ahí, sino que casi con toda probabilidad pasaría de largo y caería en el pozo turbulento (*figura 4, centro*).

Mientras la bolita se mueve podemos ir midiendo sus propiedades dinámicas; por ejemplo, su velocidad v. En la analogía del perfil de la montaña, sabemos que irá *desacelerándose* a medida que se acerque a E, para después volver a acelerarse. Es decir, un indicativo de aproximación a las soluciones inestables es la aparición de episodios de larga duración en los que la bolita se encuentra prácticamente en reposo para luego escapar a los pozos turbulentos o volver al estado de partida.

En la gráfica inferior de la figura 4 hemos representado la velocidad de la bolita en función de tiempo correspondiente a los casos (I) y (II). En el caso (I), la bolita parte con una velocidad que no le permite sobrepasar la barrera del punto E y, por lo tanto, su velocidad va disminuyendo hasta anularse al volver al punto de equilibrio B de partida. En el caso (II), la bolita tiene inicialmente la energía cinética suficiente para sobrepasar la barrera. Justo antes de iniciarse el escape al pozo turbulento, la bolita pasa por un episodio de velocidad mínima v_{min} (indicado en la gráfica de la velocidad con un círculo). Si no conociéramos *a priori* el perfil de la montaña, este método nos daría indicaciones sobre la localización aproximada de los puntos inestables.

Los algoritmos de la dinámica de flujos computacional permiten simular la evolución de una perturbación añadida al flujo de Hagen-Poiseuille. Podemos ir cambiando la escala de su amplitud inicial a nuestro antojo. Una perturbación de muy pequeña amplitud no afectará notablemente al flujo y acabará por decaer (*relaminarización* se llama a esta evolución). Pero si repetimos el proceso introduciendo amplitudes cada vez mayores, tarde o temprano obtendremos una transición a la turbulencia, tal y como hemos visto en el ejemplo anterior.

Podríamos también repetir el experimento para amplitudes intermedias que, o bien conducen a turbulencia, o bien relaminarizan. Supongamos que tenemos dos amplitudes iniciales muy semejantes, $A_1 = A_{lam}$ y $A_4 = A_{tur}$ (con A_{lam} menor que A_{tur}), que generan relaminarización y turbulencia, respectivamente. Si perturbamos el flujo con amplitudes de magnitud intermedia A_2 y A_3 (con $A_1 < A_2 < A_3 < A_4$) y vamos midiendo en función del tiempo la velocidad de la perturbación del fluido $v(t)$ en un punto cualquiera de la tubería, observaremos lo mismo que todas las trayectorias tienen una amplitud inicial prácticamente idéntica (su diferencia no es

ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY

apreciable en la representación gráfica). Transcurrido un período transitorio, las trayectorias divergen, de modo que se forma una estructura semejante a una cremallera entreabierta. Entre A_{lam} y A_{turb} podremos siempre encontrar un abanico de amplitudes iniciales que irán discriminando entre trayectorias turbulentas y relaminarizadas.

Las repeticiones sucesivas de este tipo de simulaciones numéricas nos permiten acercarnos a zonas en las que, posiblemente, se encuentren las soluciones inestables que buscamos. Dicho de otro modo, el método nos faculta para ir cerrando la cremallera. Posteriormente, podremos ir afinando la precisión de nuestras amplitudes iniciales y monitorizar la velocidad de la perturbación del fluido. Los MNK entrarán en acción más tarde, en cuanto detectemos episodios de relajación de $v(t)$.

Episodios de relajación

El procedimiento que acabamos de explicar no se puede realizar de forma experimental, dado que en el laboratorio no se tiene un control tan preciso de las perturbaciones introducidas. Con la simulación numérica se controlan la amplitud y forma de la perturbación a nuestro antojo, para monitorizar luego todas las variables del problema en espacio y tiempo. Podemos analizar la forma del flujo en cualquier instante de tiempo y para cualquier punto del espacio. En particular, queremos identificar las *estructuras coherentes* o *patrones* de los episodios de relajación, justo antes de que el flujo se vuelva turbulento.

Ya sabemos que el flujo de Hagen-Poiseuille muestra un perfil parabólico, que suele representarse mediante un corte transversal a la tubería, como se ve en la parte izquierda de la figura 7; hemos trazado, además, curvas sobre las zonas en las cuales la velocidad del fluido es la misma. Dado que el flujo es simétrico alrededor del eje, esas curvas son círculos. En la parte derecha de la figura 7 se muestra la distribución de velocidades resultante de la proyección de las curvas sobre un plano. Las zonas que tienen mayor velocidad están coloreadas en rojo, y las de velocidad menor o nula, en azul. Las dos zonas de igual velocidad trazadas sobre el paraboloide de la figura izquierda se han transformado en los dos círculos de la figura derecha, en los cuales las velocidades son un 75 % y 99 % de la velocidad máxima en el centro (U). Ese tipo de visualización permite entender de forma intuitiva la distribución de velocidades de cualquier flujo en la tubería.

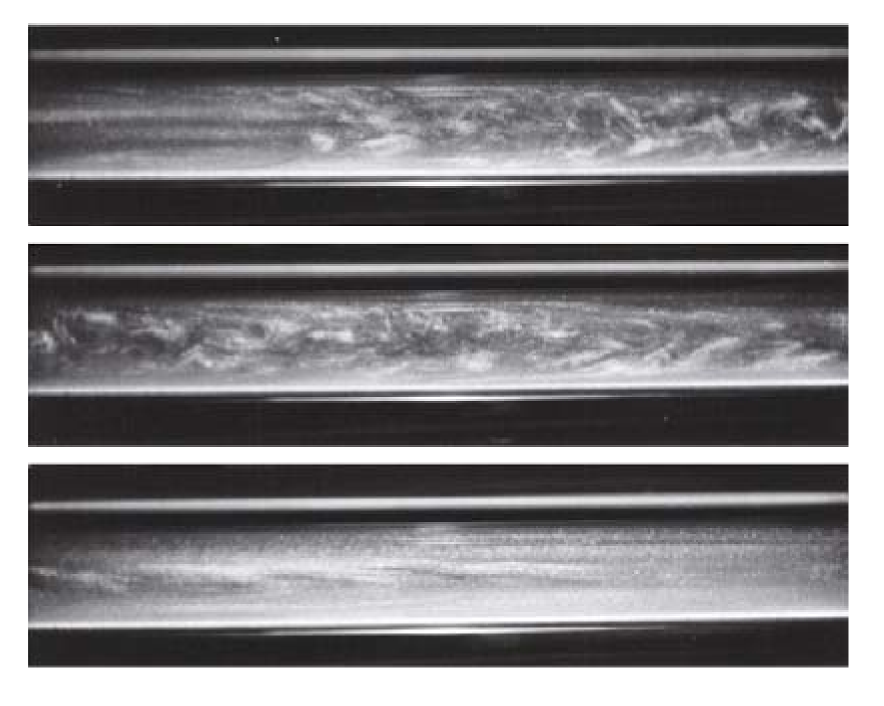
El procedimiento de ir modificando adecuadamente la amplitud nos llevará tarde o temprano a zonas cercanas a otros flujos de Navier-Stokes inestables. Refinando amplitudes con la precisión adecuada, la evolución de la perturbación pasará por estados de relajación previos a escapes turbulentos o relaminarizantes.

Veamos qué aspecto tiene el flujo durante las fases de relajación. En la imagen izquierda de la figura 8 hemos representado la distribución de velocidades axiales en un instante de relajación de la perturbación (semejante al círculo blanco representado en la gráfica inferior de la figura 4). Ese estado, que se caracteriza por mostrar zonas periféricas donde la velocidad axial es muy alta (*zonas de color rojo*) y que aprisionan una zona de muy baja velocidad axial (*zonas coloreadas en azul*), se ha observado en diferentes simulaciones numéricas llevadas a cabo recientemente por grupos de investigación alemanes y británicos, encabezados por Bruno Eckhardt y Rich Kerswell, de las universidades de Marburg y Bristol respectivamente.

Si el estado de relajación de la imagen de la izquierda de la figura 8 se encuentra próximo a soluciones de equilibrio inestable de tipo D-E, los MNK nos permitirán acercarnos a ellas de forma más exacta, pese a la naturaleza repulsora de este tipo de soluciones.

Acerca de los detalles técnicos y matemáticos del procedimiento utilizado por los MNK para encontrar las soluciones inestables, nos conformaremos con una idea intuitiva. Por decirlo de algún modo, los MNK estudian la *topografía* del perfil de la montaña representada en la figura 4. Las ecuaciones de Navier-Stokes *no* nos proporcionan el perfil global de la montaña, de modo que la exploración se realiza sólo de forma local, como si de un escalador con los ojos vendados se tratara. El escala-

10. UNA ESTRUCTURA PRETURBULENTA INTERMITENTE (UN *PUFF*) observada en experimentos con un número de Reynolds de 2575. El flujo de la tubería va de izquierda a derecha. Las fotografías superior, central e inferior muestran la cola, el centro y la cabeza del *puff*, respectivamente. Esta estructura turbulenta se encuentra confinada dentro del flujo laminar. Se puede observar el flujo a la izquierda de la fotografía superior y a la derecha de la inferior.



FLOW VISUALIZATION, SCIENTIFIC IMAGES. S TANEDA, ED. Y TRAD.: R. TAKAKI; SCIPRESS 2000

Los autores

Alvaro Meseguer y **Fernando Mellibovsky** son profesores del departamento de física aplicada de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), ambos vinculados a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB).

dor sabe que se encuentra cerca de una cima (puntos E o D), a la que le hemos acercado mediante un método dinámico. Ahora, el escalador analiza la pendiente local de la montaña y sube siempre que puede, intentando alcanzar la cima. Cuanto más próximo a ella dejemos al escalador, más fácil será que tenga éxito.

En la imagen de la derecha de la figura 8 se muestra la solución de Navier-Stokes detectada por los MNK, tomando el estado de la imagen de la izquierda como guía inicial (el hallazgo de ese estado, por los autores y el grupo de Kerswell, es reciente). Parece estar implicada directamente en la transición a la turbulencia en el problema de Reynolds. Se trata de un flujo que *no* es estacionario, sino que viaja en el mismo sentido que el flujo básico con velocidades del mismo orden de magnitud que la velocidad máxima de la solución de Hagen-Poiseuille. Su estructura, periódica en la dirección axial, tiene una longitud característica típica de unos pocos diámetros de tubería.

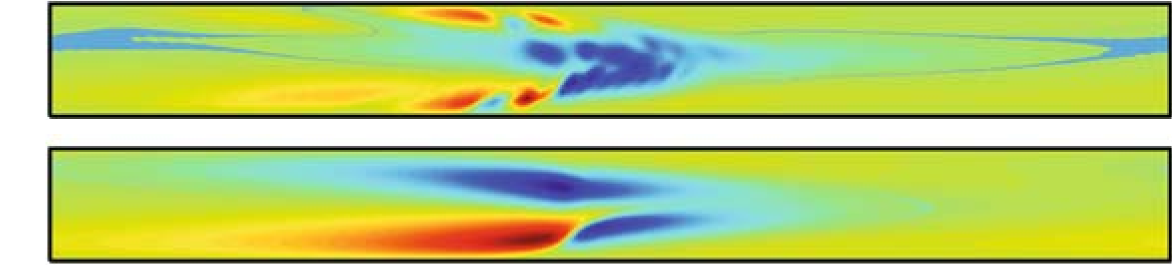
En la figura 9 representamos esas propiedades. Se ha ilustrado la distribución de velocidades axiales en un corte diametral-longitudinal de la tubería. El flujo de Hagen-Poiseuille (*figura 9, arriba*) muestra las zonas de baja velocidad (*en azul*) próximas a la pared y zonas de alta velocidad en la parte central (*en rojo*). En la imagen central hemos representado la distribución en el episodio de relajación. En este caso, las zonas azules indican una velocidad axial opuesta al flujo básico (que fluye de izquierda a derecha), las zonas amarillas corresponden a la velocidad nula y las rojas a la velocidad máxima orientada en el mismo sentido que el flujo básico. Finalmente, la imagen inferior muestra el estado encontrado por el MNK.

Hasta el momento, los experimentos realizados sobre la transición en tuberías no han detectado ese estado, ni trazas siquiera. Hay que decir que el resultado aquí expuesto es relativamente reciente y que los experimentales desconocían la existencia de semejante estado umbral o crítico. Que la dinámica de fluidos computacional se adelante a la dinámica de fluidos experimental a la hora de predecir la existencia de nuevos flujos es cada vez más frecuente. La próxima generación de experimentos partirá con la ventaja de saber dónde debe buscar.

Intermitencias

Las soluciones inestables antes descritas se encuentran a medio camino entre la laminaridad y la turbulencia, y son esenciales, desde un punto de vista teórico, para entender la dinámica del problema de Reynolds. Sin embargo, las trayectorias no relaminarizantes que escapan de esas soluciones llevan el flujo a lo que se suele denominar *turbulencia global*. La turbulencia es global cuando *todo* el dominio de la tubería pasa a ser turbulento, y hay turbulencia global cuando el número de Reynolds es suficientemente alto (Re = 2875 en el caso antes descrito). Ahora bien, un descenso a números de Reynolds ligeramente inferiores da lugar a lo que comúnmente se denomina *turbulencia intermitente* o, simplemente, *intermitencia*. Osborne Reynolds la describió en su artículo de 1883: "Otro fenómeno... era el carácter intermitente de la perturbación. Dicha perturbación aparecía de forma repentina en zonas concretas de la tubería, para después desaparecer y reaparecer de nuevo, en forma de destellos que, a menudo, tenían su inicio en un punto del tubo".

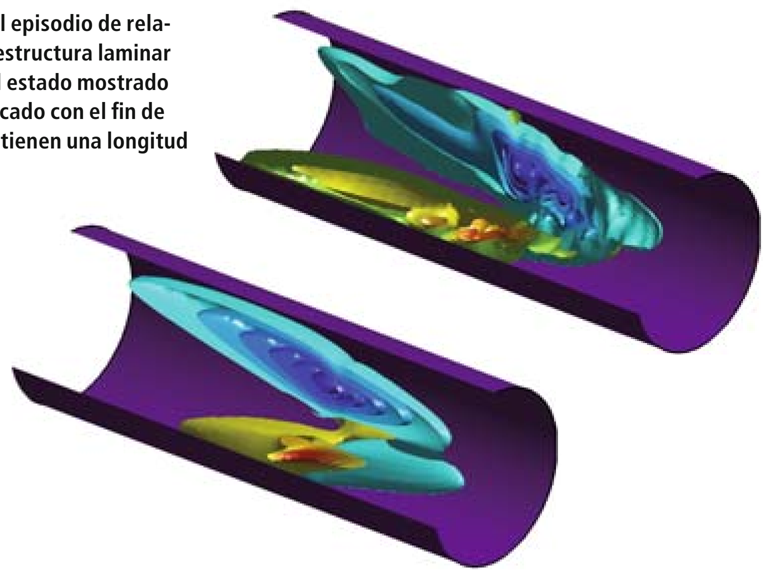
Estudios experimentales posteriores al de Reynolds confirman esa fenomenología. Es decir, el flujo en la tubería no se inestabiliza hasta números de Reynolds próximos a 2000, y tal desestabilización *no* conduce a un flujo completamente turbulento, sino a uno en el que coexisten turbulencia y laminaridad. Los experimentos han observado esa intermitencia para valores del número de Reynolds entre 2000 y 2700. Las estructuras turbulentas intermitentes aparecen en ciertas zonas del tubo y suelen tener una extensión de decenas de diámetros. Se las llama comúnmente *puffs* y son el primer síntoma de transición en el problema de Reynolds. La figura 10 muestra la fotografía de una estructura turbulenta de ésas, obtenida experimentalmente a Re = 2570. Debido a su considerable longitud, la estructura se ha seccionado en sus tres zonas principales. El marco superior muestra la cola*;* el central, la zona intermedia; y el inferior, la cabeza. Ta-



ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY

11. SECCION DIAMETRAL-LONGITUDINAL (*arriba*) de una estructura preturbulenta intermitente (*puff*) en su fase de relajación (para un número de Reynolds de 2000). Rojo y azul representan alta y baja velocidad axial, respectivamente. El flujo va de izquierda a derecha. La misma sección (*abajo*) después de aplicar el método de Newton-Krylov al estado de arriba.

12. ESTRUCTURA PRETURBULENTA (*arriba*) durante el episodio de relajación para un número de Reynolds de 2000. Abajo: estructura laminar resultante de aplicar el método de Newton-Krylov al estado mostrado arriba. La escala diametral-longitudinal se ha modificado con el fin de poder visualizar mejor ambas estructuras, dado que tienen una longitud característica de unos 60 radios.



les estructuras turbulentas y localizadas viajan solidariamente con el resto del flujo laminar, manteniendo constante su longitud. Son muy robustas, tanto que se ha llegado a dudar de si se trata de patrones transitorios o estables.

Resulta difícil determinar experimentalmente el carácter estable o inestable de las estructuras turbulentas intermitentes debido a que la tubería tiene una longitud determinada. Las tuberías utilizadas en los experimentos de Tom Mullin, de la Universidad de Manchester, y Björn Hof, del Instituto Max Planck de Göttingen, alcanzan longitudes de entre 500 a 1000 radios como máximo; las estructuras turbulentas intermitentes generadas abandonan el tubo antes de que pueda describirse su dinámica para tiempos largos. De nuevo, la experimentación se enfrenta ante una limitación inexistente en la dinámica de flujos computacional. Las simulaciones numéricas en flujos abiertos, como en el problema de Reynolds, resuelven el inconveniente de la limitación en la longitud de la tubería forzando al fluido a entrar de nuevo en el dominio tan pronto lo abandona. Dicho de otro modo, es como si pudiésemos reconectar la salida y la entrada de la tubería sin deformar su geometría ni los mecanismos físicos que conducen el fluido en su interior.

La dinámica inherente a la intermitencia constituye una pieza clave en el rompecabezas de la transición a la turbulencia. Se encuentra a medio camino entre la laminaridad y la turbulencia global. Difícilmente podremos comprender el fenómeno global sin antes entender su fase previa. Por otro lado, las estructuras turbulentas intermitentes son las primeras estructuras no laminares que aparecen en la desestabilización del flujo de Hagen-Poiseuille, si bien la coherencia espaciotemporal de las mismas podría estar gobernada por soluciones laminares inestables, similares a las que hemos descrito en la sección anterior.

Hemos repetido el procedimiento de ir variando la escala de las amplitudes de perturbación para encontrar estados de relajación, en este caso para tuberías mucho más largas y números de Reynolds cercanos a 2000. Para ello hemos ido discriminando trayectorias que, o bien se relaminarizaban, o bien generaban estructuras turbulentas localizadas. La imagen superior de la figura 11 muestra un estado de relajación previo a la generación de una estructura turbulenta intermitente. Ahí tomamos una sección diametral-longitudinal de la tubería y representamos la distribución de velocidades axiales en ella. Sobre ese estado de intermitencia preturbulenta aplicamos los MNK, de lo que resulta una estructura suave, mostrada en la imagen inferior de la figura 11. En este caso, a los MNK les cuesta determinar la estructura con más precisión, considerada la notable extensión del dominio sobre el que se han realizado las simulaciones: la computación del estado representado en la imagen inferior de la figura 12 requiere varias semanas de cálculo intensivo con un procesador potente.

El dominio mostrado en las figuras es de 100 radios y se ha modificado la escala para poder representarlas. A fin de adquirir una idea más clara de lo que parece una solución inherente al proceso de creación de una estructura turbulenta intermitente, hemos realizado una representación tridimensional de las estructuras de la figura 11. La mostramos en la figura 12, donde hemos ilustrado isosuperficies de misma velocidad axial. En ambas figuras hemos extirpado un cuadrante del dominio con el fin de dar una mejor idea de su estructura interna y de la distribución de velocidades en el interior de la estructura turbulenta intermitente.

La precisión con la que los MNK han determinado la estructura que aparece en la imagen inferior de la figura 12 no es la misma que la exhibida en la figura 8. Para determinar la fiabilidad de ese resultado sería necesario aumentar la resolución del algoritmo numérico que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes. Ahora mismo se está llevando a cabo ese trabajo. Creemos que las características a gran escala de esa estructura no cambiarán notablemente cuando aumentemos la precisión de nuestra aproximación.

ALVARO MESEGUER Y FERNANDO MELLIBOVSKY

Bibliografía complementaria

LINEARIZED PIPE FLOW TO REYNOLDS NUMBER 10^7. A. Meseguer y L. N. Trefethen en *Journal of Computational Physics*, vol. 186, n.º 1, págs. 178-197; 2003.

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF NONLINEAR TRAVELLING WAVES IN TURBULENT PIPE FLOW. B. Hof en *Science*, vol. 305, n.º 5690, págs. 1594-1598; 2004.

RECENT PROGRESS IN UNDERSTANDING THE TRANSITION TO TURBULENCE IN A PIPE. R. R. Kerswell en *Nonlinearity*, vol. 18, n.º 6, págs. R17-R44; 2005.

TURBULENCE TRANSITION IN PIPE FLOW. B. Eckhardt et al. en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 39, págs. 447-468; 2007.

CRITICAL THRESHOLD IN PIPE FLOW TRANSITION. F. Mellibovsky y A. Meseguer en *Philosophical Transactions*; Royal Society, vol. 367, n.º 1888, págs. 545-560; Londres, 2009.

DELINCUENCIA INFORMATICA

La comprensión de conductas que abren las puertas a la delincuencia informática permitirá perfeccionar las técnicas preventivas y la protección de los usuarios

Lorrie Faith Cranor

CONCEPTOS BASICOS

- La "ciberpesca", o *phishing*, es una forma de delito informático que incita a facilitar información reservada de carácter personal o empresarial. Constituye una forma de timo que cada año le detrae miles de millones de euros a sus víctimas.
- Dado que la ciberpesca depende de acciones de los usuarios de sistemas informáticos, el estudio de los motivos que llevan a picar en esta clase de cebos puede contribuir a perfeccionar las técnicas de lucha contra la ciberpesca y la mejor formación de los usuarios.
- Para anular o reducir la ciberpesca es imprescindible que los agentes de la ley, los expertos en seguridad informática y los propios usuarios aúnen sus esfuerzos.

Llevo semanas recibiendo mensajes y correos electrónicos remitidos por bancos, advirtiéndome de que los servicios "en línea" de que dispongo corren el riesgo de quedar desactivados; mensajes de eBay diciéndome que he de utilizar una nueva contraseña; de Apple, que me reclama deudas pendientes por descargas de música; de unas líneas aéreas, que me ofrecen la oportunidad de ganar rápidamente 50 euros por cumplimentar una encuesta, y de la Cruz Roja, solicitándome un donativo para las víctimas de la guerra en el Congo.

Todos esos mensajes son muy convincentes, y parecen auténticos. Pero, a excepción del mensaje remitido por eBay, todos son fraudulentos: correos electrónicos de los conocidos en la jerga por *phish*, esto es, mensajes-cebo para "ciberpesca".

Los correos electrónicos de ciberpesca son cebos elaborados por artistas del timo, concebidos para hacerlos pasar por comunicaciones legítimas, que, a menudo, parecen remitidas por entidades de renombre y de buena reputación. En general, se les solicita a las posibles víctimas que actúen sin demora, para evitar inconvenientes o recibir alguna recompensa. La respuesta esperada suele consistir en que la víctima entre en alguna página de la Red, o llame a un número de teléfono, y facilite información personal. En otras ocasiones, basta con que las víctimas "pinchen" en algún enlace o abran documentos adjuntos de los correos electrónicos para que sus ordenadores queden infectados por programas maliciosos —*malware*— que permiten a los *phishers*, o ciberpescadores, apoderarse de datos que desean, o incluso hacerse con el control del ordenador de la víctima para lanzar desde él futuros ataques.

Los detalles de los cebos difieren de un caso a otro. Lo que no empece que el resultado sea el mismo: millares de víctimas confiadas o desprevenidas le facilitan información a delincuentes, que éstos utilizan después para abrirse paso hasta sus cuentas bancarias y saquearlas, para suplantar su identidad o para ambas cosas.

El Anti-Phishing Working Group es un consorcio internacional de organizaciones dedicadas a eliminar timos y transacciones fraudulentas por Internet. Entre otras actuaciones, este grupo de trabajo rastrea las actividades de "pesca informática", y procura determinar cada mes el número de sedes de la Red que se dedican a ella. En 2007, los totales mensuales llegaron a sumar 55.643. En cada uno de esos meses, fueron utilizadas como cebo entre 92 y 178 marcas o empresas de diversas categorías, lo que significa que sus emblemas o distintivos fueron utilizados para hacer creer a las víctimas que estaban tratando con instituciones de confianza. Gartner, una firma de investigación y asesoría, estima que unos 3,6 millones de norteamericanos fueron víctimas del timo, con pérdidas que suman en torno a 2500 millones de euros.

Siendo de tal volumen las cifras en juego, la comunidad de seguridad informática se ha aprestado a desarrollar técnicas para combatir la ciberpesca, entre las que se cuentan los filtros de correo y los navegadores que denuncian tentativas de *ciberpesca*. Estos programas han contribuido, sin duda, a bloquear muchos ata-

ques, pero las tácticas de la delincuencia informática evolucionan sin cesar, tratando siempre de ir por delante de las defensas.

Y dado que los timos se fundan en puntos flacos de la conducta humana —para que un ataque tenga éxito es precisa la colaboración de la víctima, que ha de picar en el cebo y realizar alguna acción— el problema no es de carácter estrictamente técnico.

Por tal motivo, mi grupo de investigación de la Universidad Carnegie-Mellon está estudiando cuáles podrían ser los métodos más adecuados para que los usuarios aprendan a reconocer y evitar los timos informáticos. Esta investigación, a su vez, está sirviendo de orientación en el diseño de programas anti-ciberpesca (*antiphishing*), con las miras puestas en que sea más probable que se utilicen correctamente. Dado que el éxito de los ataques de pesca depende esencialmente de factores humanos, hemos descubierto que también éstos pueden servir para escudarnos contra aquéllos.



CHAD BAKER (*ordenador*) Y RIKO PICTURES (*ganchos*) *Getty Images*

Momentos instructivos

En 2004, cuando comenzamos a comprender las razones por las que se "pica" en los ataques de ciberpesca, mis colaboradoras Mandy Holbrook y Julie Downs reclutaron por las calles de Pittsburgh a voluntarios, para entrevistarlos. La mayoría de estas personas desconocía el término "phishing" o supuso que tendría que ver con Phish, un grupo musical. Otros sabían que se había utilizado como cebo el nombre de instituciones financieras, pero ignoraban que pudiera haber mensajes fraudulentos enviados, en apariencia, por compañías de venta minorista. Casi nadie tenía ideas claras sobre la forma de identificar correos-cebo, o tendían a fijarse en rasgos superficiales, como el emblema o la apariencia más o menos profesional del mensaje, para determinar si éste era legítimo. Tampoco parecían comprender los mensajes de alerta de sus navegadores, ni sabían utilizar los datos sobre direcciones de la Red o contenidos en los enlaces de los correos electrónicos para juzgar su autenticidad.

Tras confirmar la apremiante necesidad de instruir a los usuarios de Internet sobre los peligros de la ciberpesca, nuestro paso siguiente consistió en examinar los intentos de formación en *antiphishing* que facilitan las empresas, los organismos gubernativos o las asociaciones de la industria informática. No pocos de ellos contenían mucha jerga técnica y mucha más información de la que un usuario sin especial formación podía digerir. En unas cuantas sedes sí se proporcionaba información clara sobre los peligros de ser "pescado", pero la información práctica sobre cómo protegerse era más bien escasa. De hecho, descubrimos en un estudio de laboratorio que algunos de los mejores materiales para alertar de estos peligros provocaban que los usuarios mostrasen manifiesta desconfianza hacia sedes perfectamente legítimas.

Peor todavía: los mensajes que las compañías dirigen a sus empleados o clientes para advertirles de posibles ataques de ciberpesca suelen pasarse por alto. Averiguamos, en cambio, que era mucho más fácil hacer que los voluntarios leyesen correos que parecían ser mensajes de ciberpesca que hacerles leer los concernientes a medidas de seguridad. Nuestros estudios parecían indicar, pues, que las advertencias en abstracto no se traducen en medidas de protección; en cambio, una experiencia de primera mano con estos fraudes sí podía ejercer poderosos efectos instructivos.

Teniendo presentes estas ideas, Ponnurangam Kumaraguru, Alessandro Acquisti y otros miembros de mi equipo desarrollaron, con fines instructivos, PhishGuru, un sistema que proporciona información preventiva contra la ciberpesca *después* de que los usuarios hayan picado en mensajes fraudulentos simulados.

El programa incorpora un conjunto de mensajes sucintos y fáciles de poner en práctica en forma de viñetas de dibujos animados, en los que un personaje, PhishGuru, les enseña a las presuntas víctimas diversas formas de protegerse. Hemos demostrado, en una serie de estudios, que, si los usuarios leen las viñetas después de picar en los cebos que nosotros les enviamos, resulta mucho menos probable que caigan en la trampa en ataques posteriores.

Steve Sheng, alumno mío de postgrado, generalizó ese principio. A través del desarrollo de un juego formativo, en línea, al que ha llamado Anti-Phishing Phil, que enseña a identificar páginas de la Red sospechosas, al tiempo que proporciona la experiencia de ser víctima de las mañas de uno de tales "pescadores". Los jugadores asumen el papel de Phil, un pececillo que tiene que examinar las direcciones de la Red asociadas con los gusanos —los cebos— que se va encontrando, y determinar cuáles se pueden engullir sin peligro.

Cuando Phil trata de tragarse el cebo correspondiente a una dirección fraudulenta, queda atrapado en el anzuelo

El saber abstracto sobre la ciberpesca no se traduce en protección. La experiencia directa, en cambio, podría resultar mucho más instructiva.

y es extraído del agua. Aparece entonces en escena un pez adulto y más experimentado y le explica a Phil en qué se ha equivocado (*véase la ilustración* "Cómo evitar timos en Internet").

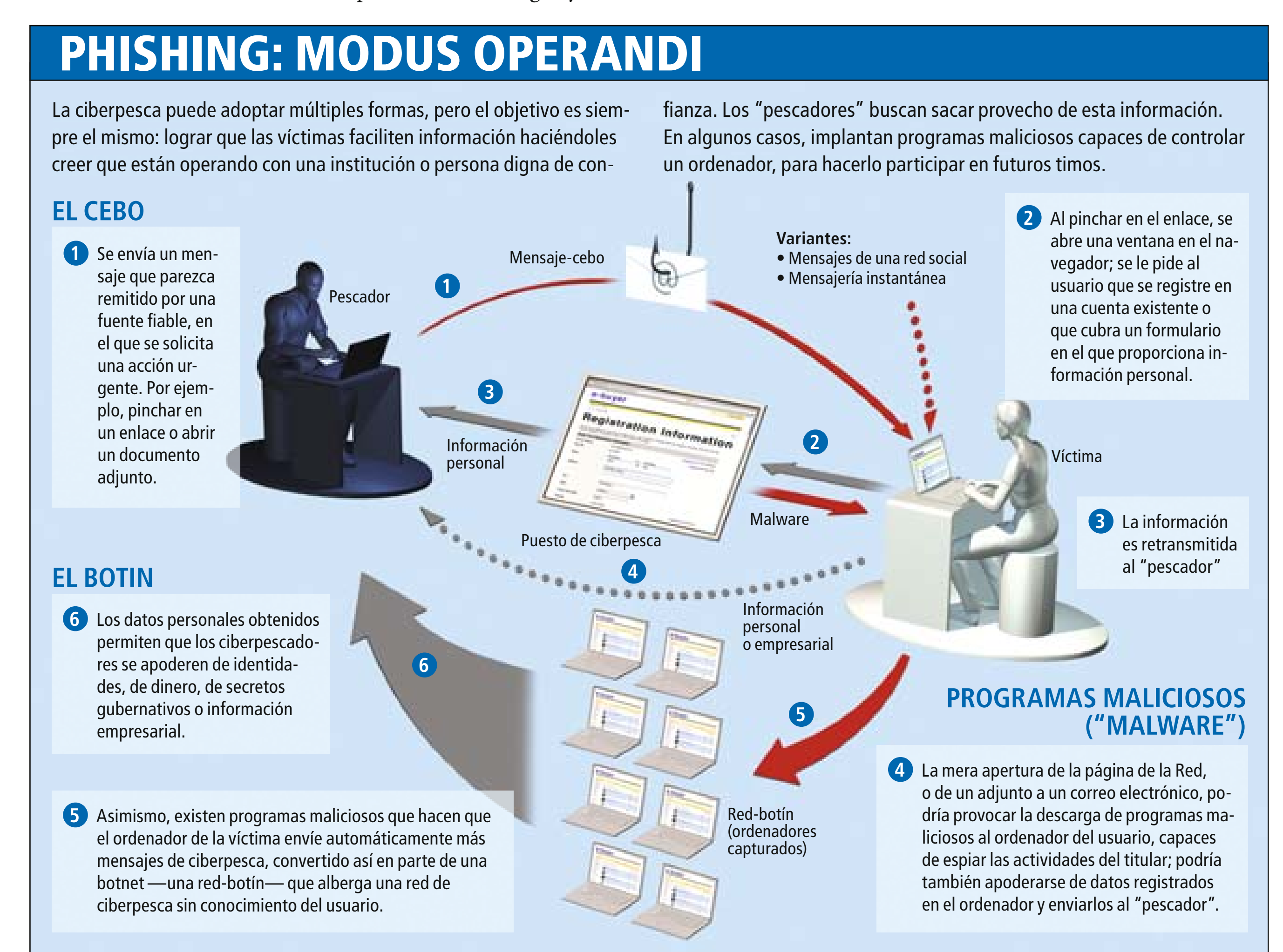
Hemos demostrado, tanto en estudios de laboratorio como de campo, que el juego establece una importante diferencia en la destreza de los usuarios para identificar los cebos. Al comparar sus rendimientos antes y después del entrenamiento con este juego, apreciamos un notorio descenso en el número de falsos negativos, es decir, puestos de furtivos erróneamente tomados por páginas legítimas, y también en la cifra de falsos positivos, sedes legítimas pero tenidas por *phishing*. Los jugadores también obtuvieron mejores resultados que quienes recibieron meras ayudas en texto, o materiales procedentes de otras fuentes.

Aunque hayamos demostrado la posibilidad de aprender a protegerse de los ciberpescadores, incluso los usuarios bien informados han de mantenerse vigilantes, y es posible que precisen de formación periódica para mantenerse a la par con las tácticas de aquéllos, pues éstas evolucionan sin cesar. Por ejemplo, El Anti-Phishing Working Group ha informado de que el número de programas y sedes de la Red dedicados a infectar ordenadores tras apoderarse de códigos y contraseñas aumentó este año de forma impresionante, por ejemplo. Otra de las tendencias actuales es la llamada "pesca con arpón", que se hace a la medida de las víctimas-diana. Tales ataques pueden adoptar la forma de mensajes enviados a los empleados de una compañía que parezcan remitidos por un directivo de esa compañía, lo que inspira confianza en los empleados y les lleva a abrir documentos adjuntos al mensaje. La información disponible en las sedes de la corporación, o a través de las redes sociales, puede serle de gran ayuda a los artífices de estos mensajes dirigidos con precisión.

Dado que los ciberdelincuentes son muy decididos, no es de esperar que los usuarios de ordenadores puedan defenderse por sí solos. Nuestro grupo desarrolla también filtros automáticos capaces de identificar posibles intentos de pesca. Pero también en ese trabajo hemos observado que las respuestas humanas pueden adquirir importancia crítica para que el filtro tenga éxito.

Una defensa polivalente

Muchos programas navegadores integran ya filtros de seguridad, o se les pueden adjuntar programas adicionales para la detección de páginas sospechosas de la Red. Pero aunque las utilidades informáticas *antiphishing* sean capaces de identificar correctamente sedes de ciber-



DETECCION DE MENSAJES-CEBO

Los ciberpescadores se valen preferentemente de envíos masivos de correo electrónico, construidos de modo que parezcan mensajes auténticos remitidos por compañías conocidas. La presencia de una marca o emblema conocido sirve de aval para el mensaje, que a menudo es aceptado como válido. Sin embargo, estos mensajes-cebo contienen indicios que permiten detectar su falsedad. Muchos resultan visibles al ser examinados con atención. Otros solamente lo son mediante programas de filtrado.

INDICIOS VISIBLES

Aspecto profesional. Emblema corporativo conocido.

Mensaje que exige una actuación urgente.

Amenaza de bloqueo de las cuentas.

Al situar el cursor sobre el enlace, la dirección visible no coincide con la subyacente de la barra de estado del programa de correo.

Asunto: Comprobación urgente de su correo Wombank
Remitente: "Wombank" <tarjetascredito@Wombank.com>
Fecha: Lunes, 24 nov. 2008 3:12 pm
Para: juninemo@xyx.com
Prioridad: Normal
Opciones: Encabezamiento completo / Versión para imprimir

WOMBANK

Estimado cliente:

Este correo le ha sido enviado por el servidor de Wombank para verificar su dirección de e-mail. Debe usted completar el proceso pinchando aquí o en el enlace al pie del texto, e introducir en el recuadro su identificador de usuario en Wombank y su contraseña. Estos datos se solicitan tanto para su protección como para garantía del servicio, pues algunos de nuestros afiliados han perdido el acceso a su dirección electrónica y precisamos actualizar nuestra base de datos. Por imperativo legal, si no confirma sus datos bancarios en el plazo de 72 horas, nos veremos obligados a limitar el acceso a sus cuentas.

Para verificar su dirección de correo y el acceso a sus cuentas, pinche aquí o en el enlace al pie. Si el enlace no se abre en pocos segundos, copie y pegue el enlace en la barra de direcciones de su navegador.

http://www.wombank.com/verificacionEmail

Rogamos disculpe las molestias que esto pueda suponerle.
Gestión de Cuentas

http://www.wombank-cuentasenlinea.com/cuentasenlinea/ResumenCuenta.htm?verificar=email

FORRAJE PARA FILTROS

HTML o JavaScript: En muchos correos legítimos aparecen ambos tipos de codificación; sin ellos, los correos de ciberpesca serían difíciles de construir, pues permiten ocultar información, como es el caso de las direcciones vinculadas.

Enlace pinche aquí: Los "pescadores" suelen valerse de enlaces legítimos a corporaciones para dar impresión de autenticidad, pero el enlace primario al que pretenden llevar a su víctima tendrá una dirección de dominio diferente.

Antigüedad del dominio: Un filtro puede examinar los registros de dominios y determinar si el dominio ha sido creado recientemente.

pesca, seguirán siendo ineficaces si los usuarios no prestan atención a sus advertencias. Con el fin de comprender por qué hay usuarios que no prestan atención a tales advertencias, Serge Egelman, otro de mis alumnos de postgrado, envió correos electrónicos simulados a los voluntarios que participaron en nuestra investigación. Después de que los destinatarios picaron en los "ganchos" y pincharon en los enlaces, sus navegadores les presentaron mensajes de advertencia.

Egelman descubrió entonces que la totalidad de los participantes que utilizaban el navegador Mozilla Firefox 2 prestó atención a las advertencias, mientras que quienes utilizaban Internet Explorer 7 (IE7) solían prescindir de ellas.

Llegamos a la conclusión de que la importante diferencia entre las respuestas de los dos grupos se podía atribuir, fundamentalmente, a que los usuarios de IE7, o bien no se fijaban en los mensajes de advertencia, o bien los confundían con advertencias menos graves. Al parecer, Microsoft también ha aprendido esta lección, y la siguiente generación del navegador Internet Explorer, IE8, cuenta ya con mensajes más claros, similares a los que presenta Firefox.

También hemos encontrado que, además de la claridad, la precisión constituye otro factor clave, que afecta al respeto de los usuarios por las advertencias de los filtros automáticos. Si la tasa de falsos positivos es elevada, se pierde la confianza en el filtro y los usuarios dejan de prestarle atención al cabo de poco. Los filtros *antiphishing* que nosotros hemos ensayado se valen de una conjunción de metodologías para detectar en la Red los mensajes y las sedes de ciberpesca. La mayoría de los sistemas disponibles comercialmente se valen de una lista negra de sitios malignos conocidos. Conforme se va informando de nuevas sedes, se las incluye rápidamente en las listas. Algunas de estas utilidades cuentan también con una lista blanca de sedes cuya legitimidad es conocida.

Sin embargo, la mayoría de los filtros no se basan exclusivamente en tales listas. Algunos analizan cada una de las sedes de la Red que el usuario visita y aplican una combinación de consideraciones heurísticas para determinar la probabilidad de que el sitio en cuestión sea fraudulento. Algunas de éstas se corresponden con el tipo de señales que nosotros enseñamos a buscar, como direcciones exclusivamente numéricas, o direcciones que se parecen a las de marcas o empresas conocidas. Los filtros escrutan también otras características que los usuarios no pueden examinar tan fácilmente. Por ejemplo, el programa puede tener en cuenta la edad de la sede, porque los sitios dedicados

La autora

Lorrie Faith Cranor enseña informática, ingeniería y política en la Universidad Carnegie Mellon, en la que dirige el laboratorio de privacidad y seguridad utilizables y encabeza un proyecto de investigación sobre la lucha contra la ciberpesca. Recientemente ha fundado Wombat Security Technologies, Inc., para comercializar productos desarrollados por su grupo.

a la ciberpesca acostumbran durar poco y mantenerse activos en plazos que van desde unas cuantas horas o días hasta escasa semanas.

El elemento tiempo puede revestir interés en el rendimiento de los filtros que se fundan principalmente en listas negras. Recientemente, nuestro grupo puso a prueba a ocho programas comerciales *antiphishing*, para lo que les suministró URL (Universal Resource Locators, o direcciones de la Red) recién salidas del horno. Descubrimos que la mayoría de dichos programas no llegaban a incluir en sus listas negras ni siquiera el 20 por ciento de los sitios de ciberpesca cuando los probamos a los pocos minutos de recibir las URL. Al cabo de cinco horas, la mayoría lograron detectar alrededor del 60 por ciento de los sitios de ciberpesca que seguían activos. Los programas que se valían de una combinación de listas negras y de consideraciones heurísticas se desenvolvieron mucho mejor, y uno de ellos llegó a detectar el 90 de las tentativas de *phishing* desde el principio de nuestro ensayo.

Nuestro grupo ha estado trabajando en programas que se valen de técnicas de aprendizaje maquinal para la detección de correos electrónicos de ciberpesca. Se trata de una técnica frecuentemente utilizada en la detección de correo-basura (el llamado *spam*), pero los detectores de *spam* no son demasiado precisos cuando se trata de mensajes de ciberpesca, pues éstos, en general, ofrecen un aspecto legítimo.

Norman Sadeh, de nuestro equipo, ha venido dirigiendo una iniciativa destinada a desarrollar una herramienta, a la que inicialmente hemos llamado PILFER, que analiza los correos electrónicos en busca de una variedad de indicios que pudieran caracterizar las "pesquerías". Por ejemplo, los correos electrónicos de pesca suelen contener enlaces en hipertexto que parecen ser los de una sede de la Red bien conocida, pero el código informático incrustado en ellos encamina a los usuarios hacia la sede del atacante. Además, las direcciones de la Red de los mensajes de *phishing* suelen contener cinco puntos o más, y apuntan hacia nombres de dominio registrados hace poco. No todos los cebos poseen tales características, sin embargo, y, en ocasiones, correos electrónicos legítimos las contienen también.

En consecuencia, los investigadores entrenan al programa —al que hemos renombrado Phish-Patrol— proporcionándole una extensa colección de correos, tanto legítimos como de ciberpesca, para que el programa pueda analizar los mensajes y aprenda cuáles de estas combinaciones de características tienen mayor probabilidad de aparecer en los mensajes-cebo. En nuestros experimentos más recientes, Phish-Patrol fue capaz de detectar más del 95 por ciento de los mensajes de ciberpesca, mientras que sólo generó falsos positivos en alrededor del 0,1 por ciento de los mensajes legítimos.

Hemos combinado, asimismo, algunas de las características de Phish-Patrol con otras metodologías, con el fin de detectar puestos de pesca en la Red. Jason Hong ha estado dirigiendo en nuestro grupo el desarrollo de una utilidad llamada CANTINA, que analiza el contenido de páginas de la Red en combinación con otros elementos heurísticos, con el fin de determinar si la página forma parte, o no, de una sede de *phishing*.

CANTINA empieza utilizando un conocido algoritmo de recuperación de información

NO CAIGA EN LA TRAMPA

- Nunca pinche en enlaces de correos o mensajes sospechosos; en especial, si le solicitan información personal. Si tiene usted relación con el supuesto remitente, abra un navegador y escriba personalmente la dirección habitual.
- Examine atentamente las direcciones, en busca de pequeños errores, como "Annazon.com". Aprenda a escrutar las direcciones de Internet en busca de indicios que hagan dudar de la legitimidad del sitio.
- Si desconfía de un sitio, busque la compañía en Google. Es improbable que la dirección sospechosa aparezca en los primeros lugares. Una compañía importante sí lo estará.
- Consulte las indicaciones del Anti-Phishing Working Group en: http://apwg.org/advice. Juegue con Anti-Phishing Phil en: http://cups.cs.cmu.edu/antiphishing_phil





ANTI-PHISHING PHIL, un juego en línea, ayuda a identificar las direcciones (URL) de las sedes de ciberpesquería. El jugador es un pececillo, llamado Phil, que tiene que optar entre comer o rechazar cebos —gusanitos— asociados a URL (*a la izquierda*). En cada nivel, se comentan las opciones y se dan nuevas indicaciones (*a la derecha*). En estudios de laboratorio, la destreza de los probandos que habían jugado para distinguir entre URL legítimas y fraudulentas duplicó a la de los formados por los medios habituales.

para identificar cinco vocablos importantes en cada página dada de la Red, pero que, en su conjunto, son relativamente infrecuentes en Internet.

Por ejemplo, en una página de inscripción en eBay, tal "signatura léxica" podría ser "eBay, usuario, firma, ayuda, olvidado". Si se emprendiera en Google una búsqueda basada en estos cinco vocablos, la página legítima de eBay aparecería entre los primeros resultados de la búsqueda. En cambio, es improbable que aparezcan las sedes de ciberpesca, porque uno de los criterios que el algoritmo patentado que Google utiliza para priorizar las páginas de la Red es el número de enlaces dirigidos a ella desde otras páginas de Internet, por lo que las páginas legítimas tienen mucha mayor probabilidad de figurar entre los resultados punteros. Empero, esta metodología no es invulnerable; en especial, si la página, aunque legítima, se ha creado hace poco. Así pues, es sólo una de las características que CANTINA tiene en cuenta al evaluar páginas de la Red.

FILTROS DE "PHISHING"

Para resultar eficaces, los filtros de *phishing* han de aplicar criterios de flexibilidad suficiente para operar ante tácticas de ciberpesca en evolución constante. Uno de los filtros que el grupo de la autora ha creado para reconocer puestos de "pescadores" de la Red alcanza un 95 por ciento de aciertos en los ensayos de laboratorio. El filtro, además de aplicar métodos heurísticos de uso frecuente, extrae también una "signatura léxica" de palabras importantes de la página; después efectúa una búsqueda en Google, para encontrar una sede legítima que contenga esas palabras.

HEURISTICA	CRITERIOS DE SOSPECHA
Antigüedad del dominio	Menor o igual que 12 meses
Imágenes conocidas	La página contiene emblemas conocidos, pero no es un dominio propiedad del titular del emblema
URL sospechosa	La dirección URL contiene un signo @, un guión, una dirección IP o más de cinco puntos.
Enlaces sospechosos	El enlace de la página contiene @ o un guión.
Formularios	En la página hay campos de introducción de texto
Resultado de la búsqueda de la signatura léxica	La URL no coincide con la dirección de la página legítima que figura en Google

La amenaza, en evolución

Quienes pertenecemos a la comunidad de seguridad informática no somos los únicos que tratamos continuamente de mejorar nuestra ejecutoria. Al tiempo que van siendo perfeccionadas las técnicas *antiphishing*, también los ciberpescadores perfeccionan sus tácticas. Los mensajes de *phishing* se están enviando ahora a través de los servicios de mensajería instantánea y de la telefonía móvil. Los ciberpescadores se valen de juegos en línea (World of Warcraft) y de los servicios de redes sociales (MySpace y Facebook) para atraer a sus víctimas. Otro tipo de ataques se aprovecha de puntos de acceso Wi-Fi instalados en lugares públicos y en *spoofing* (imitación) de las páginas de acceso de vendedores legítimos por Wi-Fi.

Estos ataques se proponen apoderarse de las contraseñas de acceso de las víctimas, así como infectar sus ordenadores con programas maliciosos.

Las bandas organizadas de ciberpescadores abusan de los miles de ordenadores que han atrapado; las utilizan como bases de lanzamiento de sus ataques. Por ejemplo, un grupo que, según se cree, tiene asiento en Europa oriental, conocido por "Rock Phish Gang" (Banda de peces de roca) se vale de estos ordenadores esclavizados como retransmisores de mensajes a los puestos de pesca. De esa forma puede enviar mensajes que parecen remitidos por tales ordenadores, enmascarando la dirección que realmente tiene en la Red el punto de pesca, lo que hace difícil a los agentes de la ley el descubrimiento del auténtico origen del ataque.

Otra táctica evasiva utilizada por esta banda consiste en un sistema denominado "flujo rápido" por los expertos en seguridad, en el que los pescadores manipulan los servidores de nombres (DNS) de Internet con el fin de cambiar sin cesar las direcciones numéricas equivalentes a los nombres de los dominios de ciberpesca.

Como es obvio, la ciberpesca sólo resulta lucrativa si los pescadores disponen de algún medio para convertir en dinero los números robados de tarjetas de crédito y demás credenciales. En consecuencia, los ciberdelincuentes suelen reclutar "muleros", para lo que ofrecen trabajos que se pueden realizar desde el propio domicilio, o establecer amistad con usuarios de Internet, a quienes convencen de que necesitan de su ayuda. Los muleros, a menudo, son a su vez víctimas sin saberlo, convencidos de haber sido contratados para realizar trabajos legítimos. Sin embargo, el auténtico trabajo del mulero es transferir dinero robado y servir de pardillo, al que atrapan los agentes de la ley.

Si mejoramos sin cesar los programas de detección de la ciberpesca y si los usuarios de sistemas informáticos se informan debidamente sobre los nuevos tipos de ataques de los ciberdelincuentes, será posible reducir el número de víctimas. También resultará útil la coordinación de las organizaciones policiales de los distintos países y, sobre todo, hacer que la ciberpesca resulte menos lucrativa. No obstante, el *phishing* seguirá siendo una especie de carrera armamentística, difícil de eliminar si no se corta de raíz, por lo que los usuarios necesitan recurrir a todas las formas de protección de que puedan disponer.

Bibliografía complementaria

PHISHING EXPOSED. Lance James. Syngress, 2005.

PHISHING AND COUNTERMEASURES. Compilación de Markus Jakobsson y Steven Myers. Wiley, 2007.

ANTI-PHISHING PHIL: THE DESIGN AND EVALUATION OF A GAME THAT TEACHES PEOPLE NOT TO FALL FOR PHISH. Steve Sheng et al. en *Proceedings of the 2007 Symposium on Usable Privacy and Security*; 18-20 de julio, 2007.

BEHAVIORAL RESPONSE TO PHISHING RISK. Julie S. Downs, Mandy Holbrook y Lorrie Faith Cranor en *Proceedings of the 2nd Annual eCrime Researchers Summit*, págs. 37-44; 4-5 de octubre, 2007.

La sede "Supporting Trust Decisions" proporciona información y enlaces relacionados con el laboratorio de investigación de Lorrie Faith Cranor: http://cups.cs.cmu.edu/trust



JEFF HUTCHENS *Reportaje de Getty Images*

1. ZONA MUERTA. Este elefante fue abatido en el Parque Nacional de Zakouma, en el Chad, en octubre de 2008. Una partida de cazadores furtivos dispararon con armas automáticas a un rebaño que estaba pastando. Es una de las 38.000 víctimas anuales estimadas del comercio ilegal de marfil.

En 1983, mientras exploraba el pequeño bosque tanzano de Malundwe, en el límite de la reserva de caza de Selous, uno de los autores (Wasser) halló, juntos, dos cráneos de elefante. Uno pertenecía a una hembra de gran tamaño. El otro, de proporciones limitadas: sus molares eran sólo la cuarta parte de los de la hembra; no presentaban siquiera señales de desgaste. Los furtivos habían matado primero al elefante joven, explicó un guarda, con el propósito de atraer a la madre y matarla para extraerle sus poderosos colmillos. Esa explotación de los lazos familiares en el complejo sistema social de los elefantes se ha repetido miles de veces en Africa.

La reserva de caza de Selous es la mayor área protegida de Africa. Pese a ello, figuraba entre las más afectadas por la caza furtiva durante las matanzas que tuvieron lugar entre 1979 y 1989, de las que la prensa informó ampliamente. Mataron al menos unos 700.000 elefantes en ese intervalo; 70.000 sólo en Selous. Después, en 1989, el nuevo director de fauna y flora silvestres de Tanzania inició la Operación Uhai, un ambicioso proyecto contra el furtivismo. El esfuerzo combinado de los guardas de la reserva, la policía y los militares no tardó en poner fin a la mayor parte de la caza furtiva del país.

Tanzania se sumó luego a otros seis países en la solicitud, que fue aceptada, de incluir al elefante africano en la lista de especies del Apéndice I de CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres), acuerdo administrado por las Naciones Unidas (ONU). La resolución prohibió el comercio internacional de elefantes y productos derivados.

La publicidad que rodeó el asunto hizo que la opinión pública reaccionara contra el comercio de marfil con tal energía, que estuvo a punto de acabar con la demanda de ese bien en todo el mundo. Se cortó, en buena medida, la caza furtiva. Las naciones europeas colaboraron para mantener la calma mediante la inyección de grandes sumas de dinero en ayudas que paliasen los efectos negativos del cese de la caza furtiva en Africa. Considerada en su conjunto, constituyó la acción normativa internacional sobre flora y fauna silvestres más eficaz de la historia. La presión del público resultó decisiva para el éxito de la campaña.

Pero la calma fue efímera. Algunos países africanos se opusieron desde el principio a una



La senda del marfil

La caza furtiva de elefantes africanos por su marfil supera hoy los índices alcanzados durante su apogeo en los años ochenta del siglo pasado. Nuevas herramientas forenses basadas en el análisis de ADN ayudan a frenar a los cárteles que operan tras ese sangriento comercio

Samuel K. Wasser, Bill Clark y Cathy Laurie

prohibición a escala continental; no dejaron nunca de abogar por su derogación. Se agotaron las ayudas procedentes de los países occidentales. Los gobiernos africanos se quedaron con los equipos antifurtivismo, pero sin dinero para su mantenimiento. Asimismo, el marfil se convirtió en un importante símbolo de nivel social para la nueva clase media de los países industrializados de Extremo Oriente, sobre todo China y Japón. La demanda de estos y otros países ricos, incluido EE.UU., hizo que el precio al por mayor del marfil de primera calidad pasara de 200 dólares por kilogramo en 2004 a 850 en 2007. El precio se duplicó de nuevo en 2009. Las autoridades chinas estimaron que el valor de venta al por menor de 790 kilogramos de marfil decomisado en el sur de China en marzo de 2008 ascendía a 6500 dólares por kilogramo.

Presionada por los países africanos que querían vender su marfil, así como por las naciones orientales que deseaban importarlo, la CITES terminó por autorizar dos tipos de ventas legales de existencias de marfil. En cada caso, éste debía obtenerse de la muerte natural o entresaca legal de animales problemáticos. Los países tenían que solicitar la participación en la venta y demostrar su progreso en la reducción del comercio ilegal de marfil. Se estableció, asimismo, un programa de seguimiento para determinar si las ventas legales iban a fomentar un aumento de la caza furtiva (aunque sus datos no se estimaron nunca suficientes para responder a esta cuestión).

En 2006, la caza furtiva había empeorado con respecto a lo que era antes de la prohibición. Aquel año, se confiscaron entre 25.000 y 29.000 kilogramos de marfil procedentes de Africa. Los grandes sindicatos del crimen se habían implicado en el comercio ilegal, ávidos de capitalizar la demanda creciente, sobre todo porque el riesgo de enjuiciamiento era bajo y la liberalización del comercio global facilitaba el tráfico de una importante cantidad de contrabando. Según los decomisos de 2006, estimamos que se elimina anualmente más del 8 por ciento de la población de elefante africano. Esa mortalidad supera la tasa de reproducción anual en condiciones óptimas (6 por ciento) y la tasa de mortalidad por caza furtiva que instigó la prohibición (7,4 por ciento anual).

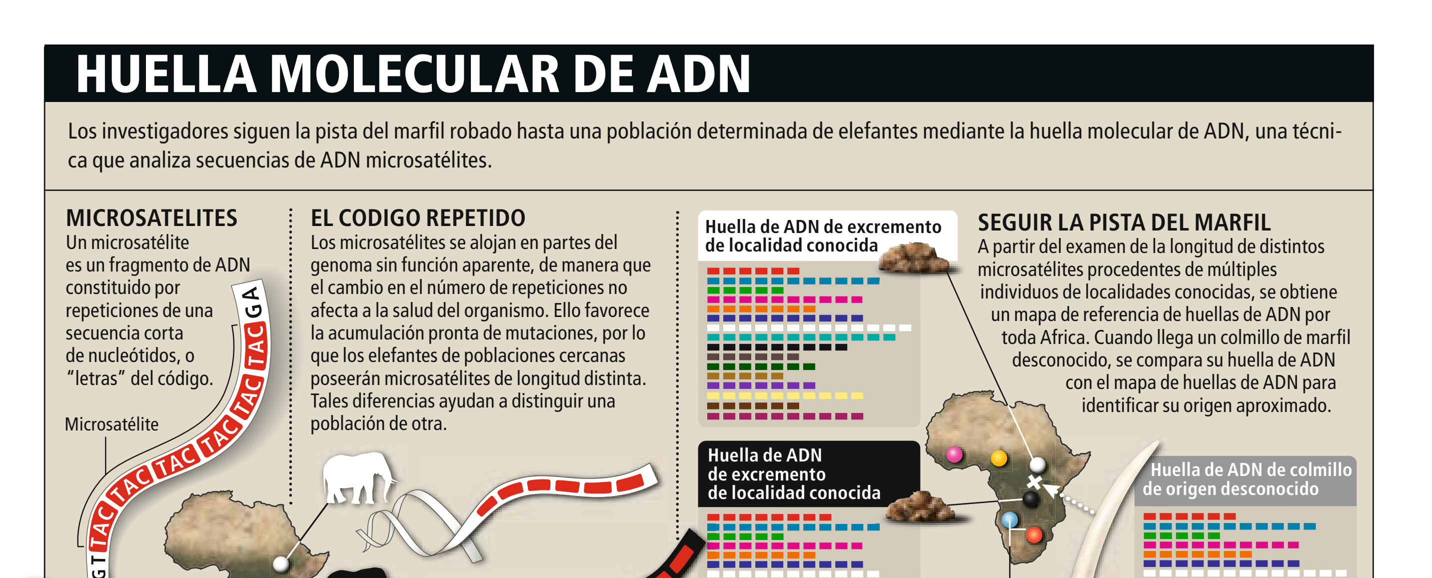
Para detener tal carnicería, los agentes de la ley necesitan centrar sus operaciones en los lugares donde se practica la caza furtiva

CONCEPTOS BASICOS

- Cuando se estaba a punto de erradicar la caza furtiva de elefantes, tras la prohibición del comercio de marfil de 1989, ha vuelto la demanda. Las poblaciones de elefantes se están diezmando con mayor agresividad que nunca.
- Los expertos están cartografiando las poblaciones de elefantes del continente africano mediante el análisis del ADN de sus excrementos.
- A partir de ese mapa y el ADN extraído del marfil se sigue la pista de los cargamentos ilegales hasta su origen. Los primeros resultados indican la existencia de redes criminales bien organizadas que se centran en grupos concretos de elefantes para su explotación intensiva.

HUELLA MOLECULAR DE ADN

Los investigadores siguen la pista del marfil robado hasta una población determinada de elefantes mediante la huella molecular de ADN, una técnica que analiza secuencias de ADN microsatélites.



JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); NASA/THE VISIBLE EARTH (*mapas*)

de elefantes. Pero hasta hace poco, resultaba prácticamente imposible seguir la pista de un contenedor de contrabando hasta el punto de origen del elefante. Un cargamento ilegal podía haber sido cazado furtivamente en un país, procesado en otro y enviado a un tercero.

Saber dónde se mata a los elefantes ayuda también a ejercer presión a países con medidas antifurtivismo ineficaces. Además, la pauta del origen geográfico proporciona pistas acerca del modus operandi de los delincuentes. Si la mayor parte del marfil de un cargamento procede de una localidad común, podemos concluir que los furtivos están centrándose en una población de elefantes específica. En ese caso, las autoridades deben perseguir una red criminal bien organizada y exclusiva. Si, en cambio, el marfil de un cargamento determinado procede de localidades alejadas, los traficantes pueden estar adquiriendo sus provisiones, mediante una red de compras oportunistas, a comerciantes de poca monta.

Con el propósito de averiguar el origen de los cargamentos, hemos desarrollado técnicas forenses que utilizan el ADN para determinar en qué lugares de Africa se concentra la caza furtiva de elefantes. Nuestros métodos moleculares guardan semejanza con los empleados para relacionar pruebas incriminantes (sangre y otros tejidos) con los sospechosos. En ese caso, la relación se establece entre muestras de marfil y poblaciones de elefante africano.

Presentamos aquí las primeras pruebas de tres decomisos que se llevaron a cabo en 2006, durante un período de dos meses. Sumados, dichos decomisos supusieron casi 11 toneladas de marfil de elefante de contrabando, más de un tercio de la redada récord de entre 25.000 y 29.000 kilogramos de marfil confiscado en 2006. Pocas poblaciones pueden soportar ese nivel de caza furtiva. Si el marfil procedía de elefantes que medraban en un área geográfica definida, ello indicaría que uno de los mayores sindicatos del marfil se hallaba detrás de las matanzas.

Los decomisos

Lunes, 3 de julio de 2006, puerto de Kaohsiung, Taiwan. Un examen rutinario de los manifiestos de embarque alerta a los agentes de aduanas taiwaneses sobre dos contenedores sospechosos. Proceden de Tanzania y se hallan en ruta hacia Filipinas, tras haber pasado otra vez por Kaohsiung durante el mismo viaje. Parece que los contenedores se mueven entre distintos puertos de Extremo Oriente una vez y otra, sin destino final aparente. Los funcionarios comprueban las copias de los documentos de embarque, que indican que en los contenedores hay fibra de sisal.

Exportar fibra de sisal de Africa a las Filipinas es como enviar bolas de nieve de Suecia a Siberia. En Filipinas se cultivan toneladas de esa planta fibrosa. Los inspectores deciden forzar uno de los contenedores. Escondidos detrás de 60 balas de sisal, descubren 744 colmillos de elefante. El segundo contenedor carga otros 350 colmillos. El escondrijo contiene en total 5,2 toneladas de marfil africano ilegal, con un valor de venta al mayor estimado en 4,6 millones de dólares y un valor de venta al detalle de más de 21 millones de dólares.

Sábado, 8 de julio de 2006, Sai Ying Pun, isla de Hong Kong. Cinco días después del decomiso en

Los autores

Samuel K. Wasser es profesor de biología y director del Centro para la Biología de la Conservación de la Universidad de Washington. **Bill Clark** preside el grupo de trabajo de la Interpol sobre crímenes contra la flora y fauna silvestres; es agente de la Autoridad de la Naturaleza y Parques de Israel. **Cathy Laurie**, profesora de genética y estadística de la Universidad de Washington, realizó los análisis estadísticos de los decomisos de Taiwan y Hong Kong. Han participado también en el proyecto Celia Mailand, del Centro para la Biología de la Conservación, que se ocupó de los análisis de ADN, y Matthew Stephens, de la Universidad de Chicago, que desarrolló los métodos estadísticos y los programas informáticos utilizados en la investigación.

Taiwan, un ciudadano informa de un horrible hedor a quemado procedente del piso de un vecino. La policía y los bomberos acuden prestos. Nadie responde a su llamada. Fuerzan la puerta. Descubren a siete personas cortando y embalando lo que resultan ser 2,6 toneladas de marfil de elefante. Las autoridades de Hong Kong decomisan 390 colmillos más otros 121 fragmentos cortados. Algunas pistas indican un origen de Africa Oriental.

Lunes, 28 de agosto de 2006, puerto de Osaka, Japón. Agentes de aduanas japoneses descubren 608 fragmentos de marfil no elaborado que, cuando se encajan cuidadosamente, conforman 260 colmillos. Con 2,8 toneladas, ese es el mayor decomiso de marfil que se haya reconocido en Japón. La numeración en *swahili* de gran parte de los colmillos sugiere que el cargamento procede de Africa Oriental. El lote importado incluye también 17.928 cilindros de marfil tallados, preparados para el mercado de sellos de rúbrica (*hanko*). Japoneses y chinos graban su sello personal en un extremo de esos cilindros, que utilizan para rubricar cheques, documentos legales y cartas. (Aunque en la actualidad éste es uno de los usos más comunes del marfil, se trata de una moda reciente; los *hankos* solían fabricarse de jade u otros materiales.) Pero los japoneses no informan del decomiso en la reunión del comité permanente de CITES de 2006, que debía decidir si permitía o no que Japón fuera el comprador de una venta de marfil antiguo de Africa austral. El 7 de octubre de 2006 el periódico *Asahi Shimbun* relata los hechos. Poco después, las autoridades japonesas reconocen el cargamento.

Al enterarnos de los decomisos, solicitamos muestras del marfil para someterlas al análisis de ADN en el Centro para la Biología de la Conservación de la Universidad de Washington. Los resultados se compartirían con los países donantes, la Organización Internacional de Policía Criminal (Interpol) y la Fuerza Operativa del Acuerdo de Lusaka, una agencia de países africanos que cooperan en la erradicación del crimen contra la vida salvaje. Hong Kong y Taiwan aceptaron voluntariamente proporcionar muestras de marfil. A pesar de numerosas peticiones, las autoridades japonesas todavía no han suministrado ninguna muestra.

Mapa de ADN

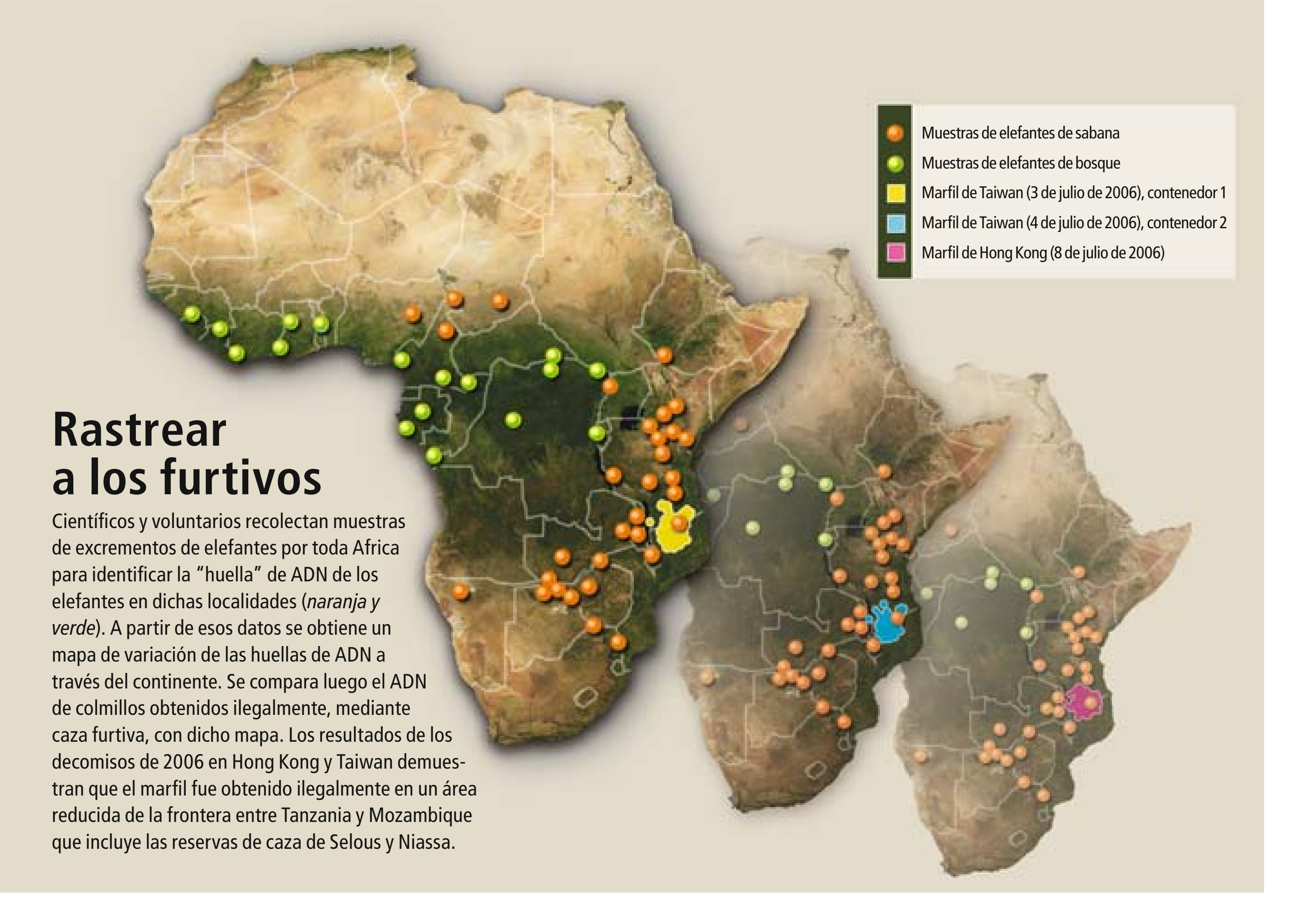
Extraemos ADN del marfil mediante una técnica de pulverización habitual en ciencia forense dental. Colocamos un fragmento de marfil del tamaño de un cacahuete dentro de un tubo de policarbonato, junto con un imán; cerramos el tubo con tapones de acero inoxidable. A continuación, se sumerge la muestra en nitrógeno líquido a –240 grados Celsius, en un molino congelador. En ese aparato, un campo magnético oscila a gran velocidad hacia atrás y hacia delante; ese movimiento aplasta el marfil contra los tapones y lo reduce a polvillo. A lo largo del proceso, la baja temperatura mantiene la integridad del ADN.

Mediante técnicas estándar, se aísla el ADN del polvo. Se elabora un perfil de variación en segmentos de ADN (microsatélites) para obtener una huella de ADN. Los microsatélites constan de dos a cuatro nucleótidos, repetidos entre 10 y 100 veces. A diferencia de los genes funcionales, los microsatélites de ADN no codifican proteínas. La variación del número de repeticiones en los microsatélites no afecta, pues, a la salud del organismo, ni a su capacidad de reproducción. Puesto que los cambios en el número de repeticiones surgen con frecuencia y persisten, los microsatélites de una población difieren entre poblaciones separadas por la geografía.

2. MERCADO BLANCO. Mercados de marfil como éste, en Kinshasa (República Democrática del Congo), se han expandido para sostener el creciente comercio del marfil. Pero la explosión real en la demanda de marfil la lideran los países industrializados de Extremo Oriente, donde se consumen en forma de sellos, o *hankos* (*abajo, izquierda*), para rubricar documentos.



MICHAEL FREEMAN *Aurora Photos* (*sellos*); PATRICK ROBERT *Corbis* (*mercado*)



Rastrear a los furtivos

Científicos y voluntarios recolectan muestras de excrementos de elefantes por toda Africa para identificar la "huella" de ADN de los elefantes en dichas localidades (*naranja y verde*). A partir de esos datos se obtiene un mapa de variación de las huellas de ADN a través del continente. Se compara luego el ADN de colmillos obtenidos ilegalmente, mediante caza furtiva, con dicho mapa. Los resultados de los decomisos de 2006 en Hong Kong y Taiwan demuestran que el marfil fue obtenido ilegalmente en un área reducida de la frontera entre Tanzania y Mozambique que incluye las reservas de caza de Selous y Niassa.

NASA/THE VISIBLE EARTH (*mapa*)

¿CUANTOS ELEFANTES SE MATAN?

La caza furtiva galopante entre 1979 y 1989 redujo la población de elefantes en toda Africa: de 1,3 millones de individuos a menos de 600.000, una pérdida del 7,4 por ciento anual. En 2006, el comercio ilegal de marfil había alcanzado de nuevo niveles preocupantes. Entre agosto de 2005 y agosto de 2006, las autoridades decomisaron más de 25 toneladas de marfil. Los agentes de aduanas suponen que una tasa de decomiso del 10 por ciento para el contrabando de "bienes generales" es un éxito; cabe, pues, estimar que aquel año se pasaron de contrabando más de 250 toneladas de marfil. Puesto que se obtienen unos 6,6 kilogramos de marfil por elefante, se estarían matando cada año 38.000 elefantes, el 8 por ciento de la población de elefantes africanos.

En un paso ulterior, se compara una huella de ADN de las repeticiones de microsatélites con un mapa de huellas de ADN de elefantes del continente africano entero. Hace unos diez años nos propusimos levantar un mapa de referencia de Africa que registrara la variación en el ADN de los microsatélites. No esperábamos que el reto fuera tan grande.

Africa es un continente muy extenso. La precisión de las asignaciones del marfil guarda una relación directa con la exhaustividad de nuestro mapa de ADN. Para facilitar la recolección de ADN de referencia, lo extrajimos de las poblaciones de elefantes de la manera menos invasiva posible: a partir de las heces. Cada gramo de heces de elefante contiene ADN de millones de células que se han desprendido de la mucosa intestinal. Recolectar suficientes heces para crear un mapa de referencia que cubriera el continente entero requirió la ayuda de numerosos científicos y guardas de parques. Les estamos reconocidos por sus esfuerzos. Pero no importa el número de muestras de excrementos de elefante que logremos recolectar; nunca tendremos bastantes para cubrir Africa en sus cuatro puntos cardinales.

Para unir los conjuntos de datos fragmentarios, desarrollamos una herramienta estadística: la técnica de asignación continua suavizada (SCAT). A partir de la extrapolación de datos obtenidos en puntos determinados, el método SCAT permite componer una distribución geográfica continua de huellas de ADN (longitudes de microsatélites de ADN en cada uno de 16 *loci*) en el área de distribución de los elefantes. Se parte del supuesto de que la semejanza genética entre poblaciones cercanas es mayor que entre poblaciones distantes. Para validar el procedimiento SCAT, se aplicó a la determinación del origen de muestras de excrementos tomadas de localidades conocidas.

Anatomía de un cargamento

Aplicamos primero nuestro método de asignación de ADN a un caso que ejemplifica la magnitud y complejidad del tráfico de marfil actual. En febrero de 2002, las autoridades de Malawi, que trabajaban con las de Zambia y con la Fuerza Operativa del Acuerdo de Lusaka, irrumpieron por sorpresa en un taller familiar de talla de marfil que usaba ostensiblemente material adquirido legalmente del gobierno de Malawi. Sin embargo, en el taller había mucho más marfil del que justificaba la documentación legal; sólo un número restringido de muestras portaba el sello preceptivo del gobierno. El botín incluía abundantes fragmentos residuales de marfil, perforados, de los que se habían extraído cilindros cortos. Se creyó que dichos cilindros correspondían a sellos de rúbricas *hanko* destinados al Japón. (Los japoneses suelen preferir sellos cilíndricos; los chinos, cuadrados.)

Tras registros minuciosos se recuperaron, en el asalto de Malawi, 19 cargamentos rea-

lizados por los mismos traficantes durante los nueve años anteriores. Todos los cargamentos identificaban al mismo expedidor, idénticos códigos de cargamento (esteatita o madera aserrada) y origen común. Casi todos tenían el mismo destino. Una de las consignaciones incluía un cargamento de 6,5 toneladas de marfil (registrado como esteatita), que se encontraba en una localidad oculta, a la espera de ser entregado.

Aquel junio, las autoridades descubrieron de pronto que el marfil que faltaba había sido transportado en camiones a Beira (Mozambique) y cargado en un barco con destino a Durban (Sudáfrica); desde allí se transfirió a otro barco con fletes para Singapur. Las autoridades locales fueron avisadas del cargamento sólo cuatro horas antes de su llegada. Confiscaron el contenedor. El cargamento incluía 532 colmillos, con un peso medio atípico por su magnitud: 12 kilogramos por colmillo y 42.000 sellos *hanko*. Los sellos de rúbrica eran cilíndricos; su diámetro correspondía a los agujeros perforados en los restos de marfil decomisados en Malawi. Varios colmillos del decomiso estaban marcados con "Yokohama", una ciudad portuaria cercana a Tokio.

En los documentos de embarque recuperados en el raid de Malawi no constaba el peso de los otros 18 cargamentos ilegales de marfil. Pero, si suponemos que cada cargamento era de tamaño similar al decomiso de Singapur, representarían en conjunto unas 110 toneladas de marfil, es decir, 17.000 elefantes cazados furtivamente.

El ingente volumen del contrabando requisado constituía un claro indicador del crecimiento del comercio ilícito de marfil. Asimismo, revelaba que una proporción importante del mismo estaba controlada por los principales sindicatos del crimen. El transporte de tamaña cantidad de marfil requiere experiencia en el comercio de mercancías, finanzas internacionales y otras materias comerciales. El negocio exige una infraestructura sólida en Extremo Oriente, con capacidad de recibir y procesar toneladas de marfil, talleres que produzcan decenas de miles de *hankos* al año y una red de comercialización, distribución y venta al por menor.

Los millones de dólares generados en las ventas deben blanquearse a través de canales comerciales legítimos y después circular alrededor del mundo para pagar nuevos envíos. Asimismo, el soborno a alto nivel es evidente. Existen informes de cazadores furtivos que han usado grandes volúmenes de productos derivados de la flora y la fauna silvestres como moneda de cambio para las armas y la munición necesarias para mantener en el poder a funcionarios corruptos.

Y mientras los beneficios son altos, el riesgo para los traficantes es bajo. Muy pocos de los grandes traficantes de animales salvajes acaban en los tribunales, porque los crímenes contra la naturaleza suelen considerarse, por parte de las autoridades, menos prioritarios que el terrorismo, el tráfico de drogas, el asesinato y el crimen financiero. Nadie implicado en el decomiso de Singapur fue procesado, ni siquiera los agentes de aduanas que firmaron su asentimiento a la declaración de esteatita (en vez de marfil). En otros países, las multas por tenencia de marfil ilegal son más bajas que los impuestos sobre su venta.

Dura y rápida

Aunque los investigadores sospechaban que el marfil confiscado en Singapur había sido procesado en las instalaciones de Malawi, era necesario el análisis de ADN para determinar si las muestras procedían de la misma fuente. Los resultados demostraron que todo el marfil compartía un mismo origen. Los colmillos y los sellos *hanko* del decomiso de Singapur, así como los restos de marfil requisados en el asalto al taller de Malawi procedían de una población de elefantes de sabana de Zambia. La relación de los *hankos* con la misma

Los elefantes no son los únicos

El tráfico ilegal de especies salvajes y de sus productos está floreciendo en todo el mundo, a un ritmo que supera con mucho la capacidad actual de vigilancia y restricción legal. De acuerdo con estudios procedentes de múltiples fuentes, el tráfico ilegal de animales salvajes se sitúa en decenas de millardos de dólares anuales. La liberalización del comercio mundial ha ayudado a ampliar el mercado de productos ilegales derivados de la flora y fauna silvestres, al igual que lo ha hecho la tecnología; a tenor de investigaciones recientes, se estarían vendiendo en Internet grandes cantidades de marfil de elefante de origen dudoso. El comercio legal de animales y plantas raros, de volumen notable (cada año se compran y venden más de 100 millones de individuos de especies raras bajo el paraguas de CITES), proporciona asimismo un conducto ideal para el comercio ilegal. Y, lo mismo que ocurre con el marfil, se está demostrando que detrás de gran parte de ese comercio legal operan sindicatos del crimen. Sólo en los últimos años, las autoridades han dado una serie de golpes que han resultado en decomisos espectaculares: 55.000 pieles de reptiles en la India, 19.000 aletas de tiburón zorro ojón en Ecuador, 23 toneladas de pangolines en Asia, 3.000 chales tibetanos (*shahtoosh*) de al menos 12.000 antílopes en la India, y 2000 tortugas estrelladas indias (*abajo*), también en la India.



KWAI CHOW WONG *Getty Images*

población que los colmillos del decomiso de Singapur explicaba la misteriosa ausencia de colmillos de tamaño restringido y medio en dicho decomiso. Los colmillos más pequeños debían haber sido tallados en *hankos* en el taller de Malawi. La estrategia servía, casi con plena seguridad, para aumentar el valor del envío a un mercado japonés; los nipones prefieren colmillos de gran tamaño. Indicaba también que caían víctimas de los furtivos individuos de todas las edades. Hacen falta muchísimos elefantes jóvenes para obtener el marfil necesario para fabricar 42.000 sellos de rúbrica.

El decomiso de 2002 se produjo el mismo año en que Zambia solicitó a CITES la autorización para incluir en una venta única a Extremo Oriente sus reservas de marfil. Pero CITES terminó por rechazar la propuesta, ante las sospechas de que parte del marfil recuperado en Singapur procediera de Zambia. Nuestros resultados apoyaron tal decisión.

El análisis del marfil decomisado en Singapur demostró que los cazadores furtivos se centraban en poblaciones específicas para su explotación intensiva. Las poblaciones eran golpeadas con dureza y celeridad, presumiblemente para satisfacer pedidos concretos por parte de los compradores. Ello contradecía la idea común de que los traficantes operaban de forma descentralizada, reuniendo grandes consignaciones mediante el acopio oportunista de marfil conforme éste se hallaba disponible por toda Africa. Sugería también que una buena estrategia para combatir la caza furtiva debía ejecutar en puntos calientes identificados las medidas legales.

Todo sigue igual

Nuestra investigación sobre los decomisos de 2006 en Taiwan y Hong Kong demuestran hasta qué punto la destrucción actual guarda semejanza con las matanzas de los ochenta. Las operaciones de 2006 implicaron un elevado nivel de organización y abundante dosis de intriga política. Nuestro estudio del ADN reveló que los colmillos procedían de un área centrada en el ecosistema de Selous, en Tanzania, que se extendía hasta la Reserva de Caza de Niassa, en el norte de Mozambique. Parece que Tanzania se ha convertido de nuevo en un foco de actividad furtiva. En este país se encuentra el Parque Nacional de Serengeti; el río Gombe, donde Jane Goodall llevó a cabo sus famosos estudios sobre chimpancés; el monte Kilimanjaro; las montañas del Arco Oriental, un punto caliente de fama mundial que linda con el Selous y alberga más especies endémicas por kilómetro cuadrado que ningún otro lugar del mundo; y, desde luego, la reserva de caza de Selous. Tanzania solicitó aquel mismo año a CITES la venta de las reservas

¿Sobran elefantes?

Tras prohibirse el comercio del marfil, algunas personas se creyeron el mito de que en Africa sobran elefantes. Los medios de comunicación se centraron en un pequeño número de países del Africa austral que solicitaban el sacrificio legal de elefantes; lo justificaban por su elevada densidad de población en áreas protegidas como los refugios de vida salvaje. Los crecientes conflictos entre humanos y elefantes parecían apoyar dichas solicitudes. Pero el problema entraña mayor complejidad de lo que parece.

En el Africa austral, la mayoría de las áreas protegidas con una densidad de elefantes elevada están valladas, lo que limita la movilidad de los paquidermos. Muchos más países africanos (incluidos varios de Africa austral) están padeciendo reducciones sustanciales en las poblaciones de elefantes, debido a la caza furtiva. A menudo los debates encendidos sobre las entresacas de paquidermos pasan por alto ese punto; sin embargo, ofrecen una solución más simple: eliminar las vallas y crear "megaparques" que trasciendan las fronteras internacionales. Muchas de las poblaciones valladas lindan con países con densidades de población bajas, de personas y elefantes, por lo que ofrecen grandes extensiones de tierra para el movimiento de los paquidermos. Los megaparques diluirían las bolsas de densidad, con el amortiguamiento consiguiente del impacto sobre el resto de la cadena trófica.

Tampoco hay acuerdo sobre las causas de los conflictos entre humanos y elefantes. Esos enfrentamientos tienen lugar con mayor frecuencia cuando los elefantes salen de sus áreas protegidas e irrumpen en las tierras agrícolas vecinas. Suele citarse la pérdida de hábitat como la causa principal, pero el efecto de la caza furtiva sobre la estructura social de los elefantes desempeña también una función clave. Las hembras adultas y viejas han sido siempre las más cazadas. Junto con los grandes machos adultos, son las que poseen los colmillos de mayor tamaño; además, a los cazadores furtivos les resulta más fácil encontrar a los grupos sociales de hembras que a los machos adultos, solitarios. De acuerdo con cierto trabajo de 1989, el 80 por ciento de los cráneos recuperados de elefantes cazados furtivamente eran de hembras, con una edad media de 32 años. Esas hembras viejas, o matriarcas, desempeñan una función clave: dirigen los movimientos del grupo y mantienen la competencia y la cohesión social del mismo. Al haber perdido a sus líderes y no proporcionar ya las "áreas protegidas" un refugio seguro debido a los furtivos, los elefantes vagan. Se han documentado éxodos masivos durante las matanzas que tuvieron lugar en las guerras civiles de Mozambique, Angola y otros países. Esos elefantes sin guía salen de sus áreas protegidas, encuentran ricas cosechas, confunden con cazadores furtivos a las pobres gentes que las defienden y luchan por su vida.



JOHN HRUSA *Corbis*



3. GOLPE NO RESUELTO. Sólo semanas después de los decomisos de Hong Kong y Taiwan, se confiscaron en Osaka 608 piezas de marfil sin pulir que sumaban 2,8 toneladas (*izquierda*). Las autoridades no han proporcionado muestras para el análisis de ADN, de manera que es imposible determinar la procedencia del marfil. Sin embargo, las inscripciones en *swahili* halladas en numerosos colmillos (*abajo*) sugieren que éstos proceden de Tanzania (el *swahili* se habla sobre todo en Tanzania y Kenya).

SOCIEDAD PARA LA CONSERVACION DE LA VIDA SILVESTRE, JAPON

de marfil, pero retiró la petición en respuesta a las presiones internacionales.

Una cuestión abierta es si el marfil embargado en Osaka procedía también de Tanzania. Mientras nuestro laboratorio analizaba los decomisos de Taiwan y Hong Kong, las autoridades japonesas concluyeron su trabajo en la mayor tentativa de contrabando de marfil de la historia del Japón. En 2007, un tribunal japonés condenó a un hombre acusado de intentar introducir las 2,8 toneladas de marfil. Recibió una condena condicional y una multa equivalente a menos del 1 por ciento de lo que aduanas estimó que era el valor de la venta al por menor del marfil. Las autoridades japonesas redujeron a cenizas el marfil, con lo que imposibilitaron el análisis de ADN. Conservaron una colección de unos 100 fragmentos diminutos, de unos 0,3 gramos cada uno. Pero no se ha podido disponer de dichos fragmentos. Y, aunque se pudiera, no estamos seguros de que proporcionaran suficiente ADN para su análisis. Japón había recibido, aquel año, la aprobación final de CITES para la compra de marfil procedente de una venta legal que tendría lugar en 2008.

Las ventas legales aludidas resultan problemáticas, por muy de cerca que se vigilen. La existencia de mercados domésticos de marfil legal, sobre todo en Extremo Oriente, influye sobre la percepción social y legitima la moda del marfil. Asimismo, los mercados legales absorben una gran proporción del marfil de contrabando y proporcionan una manera fácil de blanquear el resto. ¿De qué otra manera pueden introducirse en el comercio al por menor centenares de miles de tallas de marfil, si no es a través de los minoristas?

Los países consumidores industrializados con mercados para el marfil de contrabando no han brindado ningún apoyo a las agencias de flora y fauna silvestres en los países africanos que poseen hábitats para los elefantes, si bien son los ciudadanos de esos países ricos los que ofrecen el incentivo financiero para la caza furtiva. Los países africanos en vías de desarrollo resultan muy vulnerables frente al poder y al dinero que esgrimen los sindicatos del crimen contra la vida salvaje, poder que es alimentado por la riqueza de las economías industriales.

Aunque el análisis del ADN facilita la concentración de esfuerzos legales, se necesita más ayuda para frenar la carnicería. Mientras escribimos esto, continúan las matanzas: el 9 de marzo de 2009, las autoridades vietnamitas confiscaron un cargamento de 6,2 toneladas de marfil, que según se informó procedía de Tanzania. Se trata del segundo mayor decomiso de marfil desde la prohibición.

La concienciación del público contribuyó en gran medida a detener el comercio ilegal de marfil en 1989. Una mayor divulgación del peligro que amenaza al elefante podría conseguirlo de nuevo. Según nuestros cálculos, sólo en 2006 se mataron por su marfil más de 38.000 elefantes africanos. Todo indica que se mantienen los índices de caza furtiva; es más, en algunos países existen informes de furtivismo creciente. Si el tráfico ilegal de marfil no se pone pronto bajo control, Africa perderá a la mayoría de los elefantes que viven en libertad. El continente no volverá a ser el mismo. Un precio excesivo para una mercancía cuyo destino principal es satisfacer la vanidad humana.

Bibliografía complementaria

ELEPHANT REFLECTIONS. Fotografías de Karl Ammann. Texto de Dale Peterson. University of California Press, 2009.

ANIMAL INVESTIGATORS: HOW THE WORLD'S FIRST WILDLIFE FORENSICS LAB IS SOLVING CRIMES AND SAVING ENDANGERED SPECIES. Laurel A. Neme. Scribner, 2009.

COMBATING THE ILLEGAL TRADE IN AFRICAN ELEPHANT IVORY WITH ADN FORENSICS. Samuel K. Wasser *et al.* en *Conservation Biology*, vol. 22, n.º 4, págs. 1065-1071; 2008.

FARMACOS ALOSTERICOS

Se están elaborando medicinas que obran su poder actuando sobre puntos inesperados de las biomoléculas

Melinda Wenner

CONCEPTOS BASICOS

- Una nueva metodología para el descubrimiento de fármacos se funda en el alosterismo.
- Los compuestos alostéricos se unen a las biomoléculas en puntos apartados de las dianas habituales de los medicamentos.
- A diferencia de los fármacos clásicos, que activan o inhiben la molécula diana, los alostéricos operan a modo de regulador: la atenúan o activan de forma gradual. En ciertos casos, provocan efectos secundarios más leves.
- Tales agentes podrían aplicarse al tratamiento de enfermedades todavía sin terapia.

A pesar de lo que pudieran sugerir las estanterías de nuestra farmacia, repletas de productos, los laboratorios farmacéuticos siguen en la brecha, tratando de hallar nuevos principios activos. Se han cosechado ya los frutos más accesibles. Asimismo, el principal método de descubrimiento, tan fecundo en decenios pasados, proporciona en nuestros días muchos menos éxitos. Pero ahora una estrategia de nuevo cuño, centrada en una propiedad denominada alosterismo, infunde aliento a numerosas investigaciones. Se ha profetizado que podría revolucionar el hallazgo de nuevos agentes y generar tratamientos para males que, hoy por hoy, resultan imposibles de recibir tratamiento.

Tradicionalmente, el desarrollo de fármacos ha consistido en hallar moléculas que remeden el comportamiento de las moléculas mensajeras del organismo, como las hormonas o los neurotransmisores. Los sosias farmacológicos de tales sustancias endógenas se anclan en moléculas receptoras de la superficie celular, en los mismos puntos donde lo hacen las sustancias nativas. Si la imitación se aloja con precisión en el receptáculo (sitio activo), como una llave en su cerradura, se activa el receptor, lo que provoca una cascada de reacciones bioquímicas intracelulares. Si el remedo tiene una forma ligeramente distinta, provocará el efecto contrario: impedirá esa cascada de reacciones. La mayoría de los fármacos disponibles en el mercado (antialérgicos, betabloqueantes, antipsicóticos) opera de alguno de esos modos.

El problema de esos fármacos reside en que su efecto es de "todo o nada". Estimulan o reprimen rutas fisiológicas, sin dejar lugar para las fluctuaciones normales de actividad. Y dado que el organismo, en su evolución biológica, ha ido utilizando unos mismos compuestos para fines diversos, ocurre a menudo que una molécula endógena se enlaza a diferentes subtipos de receptores, responsables cada uno de tareas distintas. Ello significa que los fármacos concebidos con el propósito de replicar la acción sobre un subtipo de neurotransmisor, sea por caso, pueden acabar afectando a muchos subtipos y provocando efectos secundarios. Tales limitaciones han hecho imposible hallar terapias seguras para ciertas enfermedades.

Las laboratorios farmacéuticos, merced a unos cuantos descubrimientos felices propiciados por el avance de la técnica, están yendo más allá de los fármacos clásicos, que actúan por imitación. Han salido a la caza de agentes que interactúen con regiones receptoras



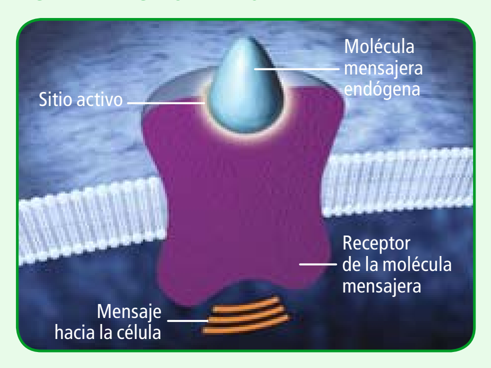
SLIM FILMS

Los agentes terapéuticos conocidos como moduladores alostéricos ("alostérico" significa "otro sitio") apuntan a dianas apartadas de los blancos moleculares sobre los que suelen operar los fármacos clásicos y las sustancias naturales del propio cuerpo.

¿EN QUE CONSISTE LA DIFERENCIA?

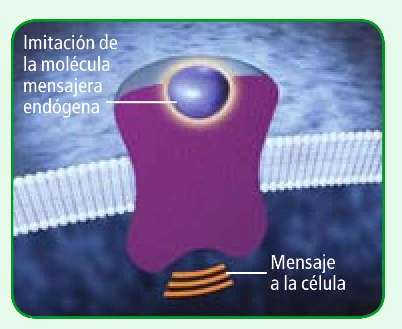
Cuando una de las moléculas que el cuerpo produce de forma natural, como un neurotransmisor, se acopla en el sitio activo de su receptor celular (*derecha*), como una llave en su cerradura, el receptor activa una cascada de señales intracelulares que acaba modificando la actividad de la célula. Muchos fármacos actúan por inhibición o amplificación de tales mensajes.

ACTIVIDAD CELULAR NORMAL



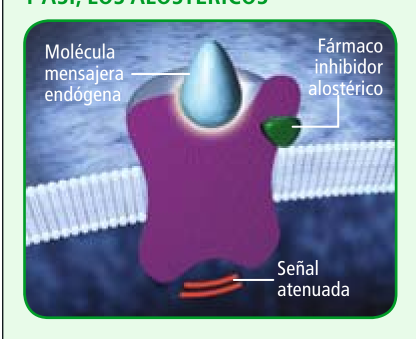
ASI ACTUAN LOS FARMACOS CLASICOS

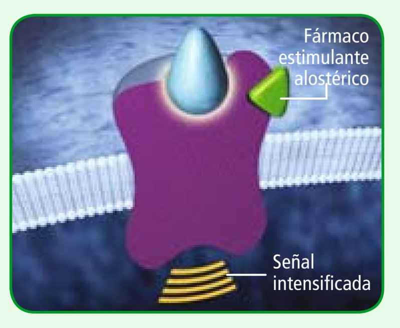




Los fármacos típicos, cuando se enlazan al sitio activo ocupan el lugar propio de la sustancia nativa; con ello bloquean los mensajes de la molécula endógena (*izquierda*) o remedan sus efectos (*derecha*).

Y ASI, LOS ALOSTERICOS





Los fármacos alostéricos no se dirigen al sitio activo. Se unen a otras zonas, alterando la forma del receptor. De ese modo se atenúa (*izquierda*) o intensifica (*derecha*) la respuesta del receptor a la sustancia endógena. Los agentes alostéricos podrían provocar que el sitio activo asiera un neurotransmisor con menor o mayor eficacia de lo habitual.

topográficamente diferenciadas de los puntos de atraque de los compuestos naturales del organismo. Esos compuestos alostéricos (alostérico significa “otro lugar”) interaccionan con dominios concretos de subtipos de receptores, con la limitación consiguiente de efectos secundarios.

La interacción se produce sólo con un conjunto restringido de receptores dotados de esos dominios. Los nuevos agentes no son meros conmutadores del tipo “todo o nada”; antes bien, sus efectos pueden matizarse, de modo que intensifiquen o atenúen, según convenga, la actividad de una vía de señalización.

A la vanguardia de la investigación en compuestos alostéricos se encuentra una firma suiza de biotecnología, Addex, la primera compañía que ha dedicado toda su línea a fármacos alostéricos. En colaboración con varios laboratorios, Addex está llevando a cabo estudios clínicos. También otras compañías han tomado idéntico rumbo: preparados alostéricos creados por Pfizer y Amgen han obtenido la aprobación de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense (FDA) para el tratamiento del VIH y la insuficiencia renal crónica.

Orden en el caos

El alosterismo no es cosa nueva. Los fisiólogos que en los albores del siglo XX estudiaban las enzimas (proteínas que catalizan reacciones bioquímicas) ya lo conocían: moléculas de tamaño restringido se enlazaban a menudo en diversos sitios de la enzima, modificando su forma y su función. No obstante, la idea de que el alosterismo pudiera servir para la preparación de fármacos no cuajó hasta hace unos quince años. Surgió de forma insospechada.

Desde hace tiempo, los laboratorios farmacéuticos vienen orientando casi todos sus esfuerzos hacia los “receptores acoplados por proteínas G” (RAPG), un tipo de moléculas integradas en la superficie celular. Esas proteínas serpentiformes se entretejen y penetran siete veces a través de la membrana celular; dan inicio a procesos intracelulares que responden a los acontecimientos ocurridos en el exterior de la célula. Cuando un ligando —una molécula cuya diana es un receptor— se enlaza al sitio activo de un RAPG del exterior de la célula, el receptor cambia de forma para activar una proteína G, que, a su vez, desencadena en el interior celular una cascada bioquímica.

Nuestro organismo produce más de 800 tipos de RAPG; en la superficie de cualquier célula se asientan alrededor de un centenar de estos tipos. Pero los fármacos existentes en el mercado operan sólo sobre una octava parte de todos nuestros RAPG. En opinión de Arthur Christopoulos, de la Universidad Monash en Australia, estamos tocando sólo la punta del iceberg de los RAPG.

En los años ochenta y primeros noventa del siglo pasado, la búsqueda de fármacos RAPG se efectuaba por triaje de radioligandos. Una vez identificado el receptor al que se pretendía afectar (un receptor asociado a la senda química de una enfermedad), se le anclaba un ligando conocido, marcado radiactivamente. A continuación, los receptores anclados se inundaban con principios presuntamente activos, para ver cuáles desprendían los ligandos

KENNETH EWARD

marcados. Cuantos más ligandos eliminaba el principio, mayor el "acierto".

Esos ensayos estaban diseñados para hallar compuestos que se enlazasen con el sitio activo, o sitio "ortostérico". No se descubrieron fármacos alostéricos que afectasen de modos distintos a la función del receptor, pero tampoco era ese el objetivo de los expertos: los compuestos ortostéricos constituían la elección primera y obvia. Desdichadamente, y por razones que no están del todo claras, andando el tiempo esa metodología dejó de proporcionar compuestos prometedores en abundancia.

Hará unos quince años, los laboratorios farmacéuticos comenzaron a ensayar un enfoque nuevo, más fisiológico. Se valieron de ensayos "funcionales" que, en lugar de estudiar sólo el enlace con los receptores, supervisaban de qué modo afectaban los compuestos candidatos al comportamiento de células reales, intactas, portadoras de receptores de interés. Empezaron a obtenerse resultados interesantes.

En ocasiones, una molécula intensificaba la función de un receptor; en otras, lo inhibía. Ese comportamiento no se correspondía con el de los compuestos ortostéricos, que hubieran producido resultados concordantes. Si bien algunos expertos comprendieron que la responsabilidad de los diversos efectos correspondía al alosterismo, la mayoría no lo consideró provechoso, sino problemático.

Entonces, en 1999, SIBIA Neurosciences, una pequeña empresa biotecnológica de La Jolla, en California, en colaboración con Novartis, informó del descubrimiento de uno de los primeros moduladores alostéricos: una molécula que atenuaba la actividad del receptor 5 de glutamato metabotrópico (mGlu5), uno de los más de 30 subtipos de receptores de glutamato, un neurotransmisor. SIBIA había estado buscando un modulador selectivo de mGlu5 porque este receptor desempeñaba una función destacada en trastornos neurológicos; entre ellos, la epilepsia.

Era la primera vez que un laboratorio descubría una molécula así, rememora P. Jeffrey Conn, de la Universidad Vanderbilt. Con todo, la mayoría de los laboratorios se mostraron reacios a buscar agentes alostéricos, pues sus efectos resultaban a menudo impredecibles. La idea no fue bien recibida entre los especialistas en RAPG.

El antagonista de mGlu5 creado por SIBIA no llegó a concretarse en un fármaco comercial, pero sí dio en qué pensar a algunos científicos. En 2001, Vincent Mutel, entonces en Roche y actualmente gerente de Addex, y sus colaboradores descubrieron, por azar, una molécula alostérica que intensificaba la actividad del receptor 1 de glutamato metabotrópico (mGlu1). Ese subtipo no estaba asociado a ninguna enfermedad concreta, pero el hallazgo convenció a Mutel de que las moléculas alostéricas podrían servir no sólo como antagonistas de la actividad de los receptores, sino también como intensificadores. Y sospechó que podrían hallarse moduladores alostéricos para otros receptores de glutamato. Se sabía que algunos de esos receptores intervenían en trastornos como la ansiedad o la esquizofrenia.

Mutel se sintió tan inspirado, que abandonó Roche a finales de 2001. Junto con otros colegas de GlaxoSmithKline, Roche y PricewaterhouseCoopers, fundó Addex para llevar adelante la idea.

Cambios pequeños, grandes dividendos

Los compuestos alostéricos pueden ofrecer ventajas sobre las moléculas ortostéricas tradicionales, tanto por lo que no pueden hacer cuanto por lo que sí pueden. Al enlazarse, las moléculas alostéricas modifican sutilmente la forma del receptor, lo cual, a su vez, altera la facilidad con que el ligando natural conecta con el sitio activo. Esa función auxiliar explica que los moduladores alostéricos no ejerzan, por lo común, efectos apreciables, a menos que se halle presente el ligando natural. Si se desarrolla una enfermedad porque determinado compuesto se produce con normalidad pero no se une a su receptor con la intensidad que debiera, un fármaco ideal tendría que mejorar tal enlace, aunque sólo cuando se hallase presente dicho compuesto. Tal hazaña le está reservada en exclusiva al agente alostérico; un compuesto ortostérico activaría al receptor en cuanto ingresase en el organismo, lo que no concordaría con la dinámica natural.

La tendencia a inducir efectos en presencia del ligando natural conferiría a los fármacos alostéricos mayor seguridad que la de algunos ortostéricos. Cuando se descubrió el Valium, se desconocía su mecanismo de actuación. Hoy sabemos que se trata de un modulador alostérico que potencia la actividad del receptor de GABA, el principal de los neurotransmisores inhibidores que produce nuestro organismo.

Otros depresores del sistema nervioso central, como el fenobarbital, ingeridos en grandes dosis pueden resultar mortales. El Valium, en cambio, se limita a instalarse sobre el receptor; no actúa hasta que el cerebro libera GABA. Entonces, cuando el GABA se une a su receptor, su acción se intensifica de 5 a 10 veces. Si uno ingiere demasiado Valium, duerme hasta que lo ha eliminado.

En cuanto a lo que sí pueden hacer los compuestos alostéricos, su interacción con receptores más allá del sitio activo conlleva una capacidad específica de enlace con subtipos



Los nuevos agentes no son meros interruptores "todo o nada". Ofrecen efectos matizados: intensifican o amortiguan la actividad de una vía de señalización.

individuales. Muchos receptores, al evolucionar, han acabado respondiendo a un mismo ligando ortostérico, explica Darryle Schoepp, vicepresidente de Merck & Co. Un neurotransmisor podría operar sobre una docena de subtipos de receptores, responsable cada uno de la activación de una cascada biológica distinta. La naturaleza, empero, no ha tenido una poderosa necesidad de mantener idénticas otras partes de los receptores. En consecuencia, un modulador alostérico podría unirse a un punto no ortostérico en el subtipo mGlu2, pero no hallar un anclaje en mGlu3 o en otros subtipos, con lo que evitaría actuar innecesariamente sobre variantes del receptor cuya modificación de actividad provocara efectos secundarios.

Esos fármacos poseen también efectos matizados, ya que influyen de diversos modos en la configuración de un receptor. Administrarlos sería como sustituir por atenuadores los interruptores de la luz. Ello permitiría un abanico de resultados: podría afinarse el receptor para que fuese ligeramente activo, bastante activo o sumamente activo. En opinión de Terry Kenakin, investigador en GlaxoSmithKline, puesto que un gran número de enfermedades se caracterizan por sutiles perturbaciones de carácter bioquímico o de procesamiento de señales, resultaría de gran utilidad que los farmacólogos pudieran "retocar" el organismo para devolverlo a la normalidad.

De la idea a la aplicación clínica

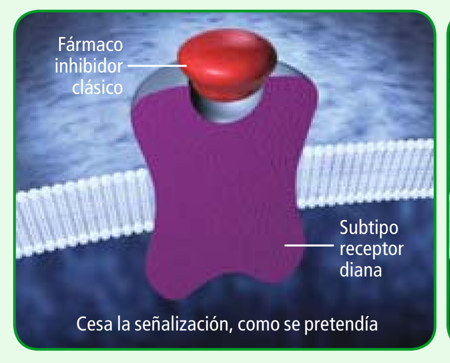
Al ser tantas sus ventajas, el alosterismo es ya un concepto de uso común entre farmacólogos. El campo está experimentando un desarrollo más que notable.

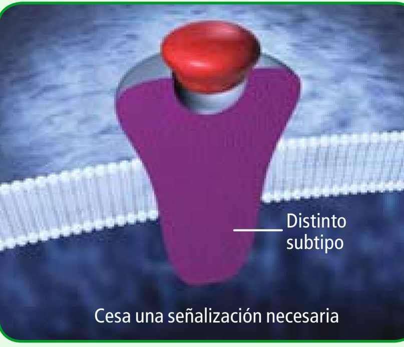
Addex cuenta en su biblioteca de compuestos con 60.000 posibles moduladores alostéricos, que está examinando en busca de efectos sobre varios RAPG, canales iónicos y receptores de otros tipos. Su compuesto ADX10059, que atenúa la capacidad de enlace con el glutamato en el receptor mGlu5, se está ensayando en humanos para verificar su eficacia contra la migraña y contra el ardor asociado al desorden de reflujo gastrointestinal. Otro de los antagonistas de mGlu5 de Addex,

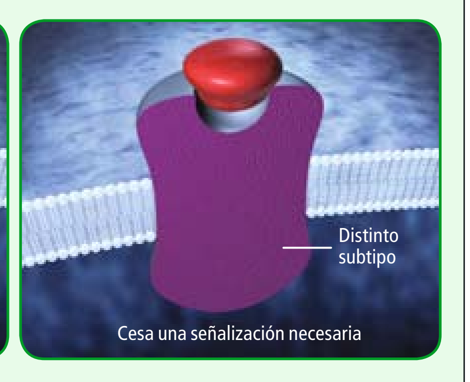
REDUCCION DE EFECTOS SECUNDARIOS

Si un receptor adopta diversas formas, es probable que un fármaco clásico dirigido hacia el sitio activo de uno de los subtipos afecte también a otros subtipos afines, pues éstos tendrán sitios activos parecidos. Puede suceder entonces que un inhibidor suministrado para bloquear a uno de los subtipos (*izquierda, panel superior*) inhiba a otros de su misma familia, necesarios para el paciente (*arriba, centro y derecha*), con lo que provocará efectos secundarios. Pero un fármaco alostérico podría unirse a un sitio específico de un solo subtipo (*izquierda, panel inferior*), sin afectar a los demás subtipos (*centro y derecha, panel inferior*); así se limitarían los efectos secundarios.

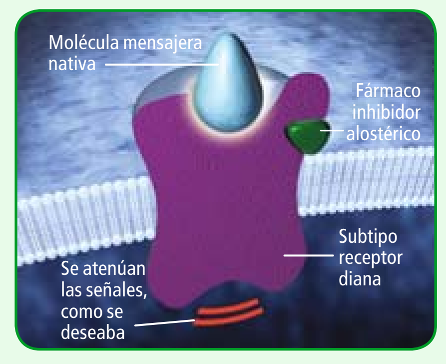
UN FARMACO TIPICO AFECTA A DEMASIADOS RECEPTORES

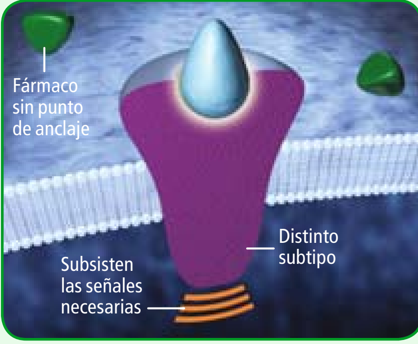


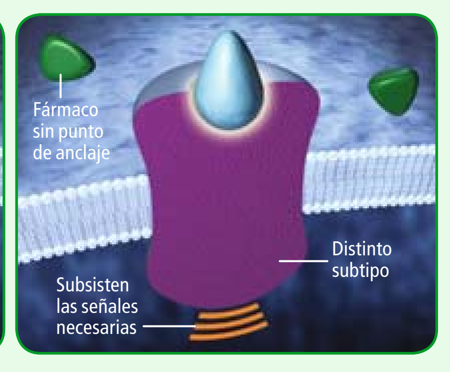




UN FARMACO ALOSTERICO PUEDE ACTUAR SOBRE UN RECEPTOR SUBTIPO ESPECIFICO







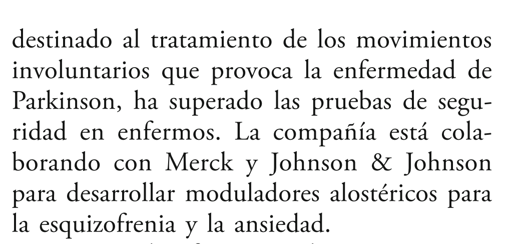
KENNETH EWARD

EN EL MERCADO, O CASI

Dos nuevas drogas alostéricas han llegado al mercado en estos últimos años; otros se hallan ya, o casi, en la fase de ensayos con humanos, para un abanico de enfermedades. Los fármacos en desarrollo que se mencionan aquí afectan a receptores de neurotransmisores; se encuentran en fases iniciales de ensayo (fase I o II).

ENFERMEDAD	PRINCIPIO Y FABRICANTE	ACCION	ESTADO
Insuficiencia renal crónica	Cinacalcet (Amgen)	Potencia la actividad de los receptores de calcio	Comercial
Déficits cognitivos de la enfermedad de Alzheimer	XY4083 (Xytis)	Potencia la actividad del receptor del subtipo alfa7 de la acetilcolina nicotínica	Completados los ensayos de toxicidad
Déficits cognitivos de la esquizofrenia	GSK729327 (GlaxoSmithKline)	Potencia la actividad de los receptores de glutamato ionotrópico de tipo AMPA	Ensayos iniciales
Reflujo gastroesofágico	ADX10059 (Addex); AZD2066 (AstraZeneca); AFQ056 (Novartis)	Inhibe al receptor 5 del glutamato metabotrópico	Ensayos iniciales
VIH	Maraviroc (Pfizer)	Actúa sobre el receptor CCR5 para impedir el ingreso del VIH en las células	Comercial
Dolor	Xen2174 (Xenome)	Inhibe al vector de norepinefrina	Ensayos iniciales
Enfermedad de Parkinson	ADX48621 (Addex); AFQ056 (Novartis)	Inhibe al receptor 5 del glutamato metabotrópico	Ensayos iniciales





destinado al tratamiento de los movimientos involuntarios que provoca la enfermedad de Parkinson, ha superado las pruebas de seguridad en enfermos. La compañía está colaborando con Merck y Johnson & Johnson para desarrollar moduladores alostéricos para la esquizofrenia y la ansiedad.

Dos son los fármacos alostéricos que se han abierto paso hasta el mercado: cinacalcet (Sensipar en EE.UU.), de Amgen, que fue aprobado en 2004 para activar receptores de calcio y para el tratamiento de la insuficiencia renal crónica, y el maraviroc (Selzentry), aprobado en 2007 contra el VIH. El maraviroc se introduce en las células mediante su enlace al receptor CCR5, que en condiciones normales se une a compuestos inmunitarios del grupo de las quimiocinas; de forma análoga, CCR5 prende al VIH y le facilita la entrada a la célula. Selzentry altera la conformación del receptor CCR5 de un modo tal, que impide que el VIH se adhiera al CCR5. Desafortunadamente, el fármaco impide también el enlace de las quimiocinas, pues éstas ayudan a las células a combatir el VIH. Cabe esperar en el desarrollo de compuestos que cierren el paso al VIH sin bloquear el ingreso de las quimiocinas.

Pero los agentes alostéricos no se hallan exentos de problemas. Lo que justamente tanto frustraba a los científicos en un principio (efectos distintos de un experimento a otro) sigue constituyendo un gran quebradero de cabeza. Los RAPG se encuentran en células de todo tipo, se acoplan a las proteínas G y hay muchísimos tipos de proteínas G. Un mismo RAPG puede tener multitud de ligandos y hallarse asociado a distintas rutas bioquímicas según, entre otras cosas, el tejido en donde se aloje el receptor. En consecuencia, los compuestos alostéricos que aspiren a convertirse en fármacos deben ensayarse repetidamente y en diferentes tejidos para verificar que operan de la forma esperada en los lugares deseados.

En cuanto a la toxicidad de los fármacos alostéricos, quizá sea, por término medio, menor que la de los ortostéricos. Ello se debe a que podrían administrarse a concentraciones menores (no compiten con el ligando natural) y a que no suelen afectar al receptor, a menos que se encuentre presente el ligando natural. Aun así, no todos los fármacos alostéricos serán seguros; algunos podrían provocar efectos secundarios al unirse y afectar a receptores no relacionados. Pese a todo, los farmacólogos confían en que el alosterismo abra nuevas vías para el desarrollo de nuevos medicamentos.

Bibliografía complementaria

NUEVAS DIANAS FARMACOLOGICAS. Terry Kenakin en *Investigación y Ciencia*, n.º 351; diciembre, 2005.

ALLOSTERIC MODULATION OF G-PROTEIN COUPLED RECEPTORS. L. T. May, K. Leach, P. M. Sexton y A. Christopoulos en *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, vol. 47, págs. 1-51; 2007.

ALLOSTERIC MODULATORS OF GPCRS: A NOVEL APPROACH FOR THE TREATMENT OF CNS DISORDERS. P. Jeffrey Conn, Arthur Christopoulos y Craig W. Lindsley en *Nature Reviews Drug Discovery*, vol. 8, n.º 1, págs. 41-54; enero, 2009.

PROMISE OF MGLUR2/3 ACTIVATORS IN PSYCHIATRY. P. Jeffrey Conn y Carrie K. Jones en *Neuropsychopharmacology*, vol. 34, n.º 1, págs. 248-249; enero, 2009.

Empuje lumínico

¿Inmaterial, la luz? Los haces luminosos ejercen, sin embargo, unas fuerzas perfectamente tangibles. Quizás algún día harán volar los aviones y pondrán satélites en órbita

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

De no haber fracasado el lanzamiento, y de haber ocurrido todo según lo previsto, el 30 de abril de 2005 el satélite *Cosmos 1* habría sido puesto en órbita alrededor de la Tierra; después, como un velero, se habría desplazado y cambiado de órbita bajo el único efecto de la radiación solar incidente en sus alas. En octubre de 2000, la sociedad norteamericana Lightcraft Technologies puso en vuelo a 71 metros de altura, con ayuda de intensos impulsos láser, un ingenio miniatura de 50 gramos. ¿Cómo propulsa la luz dichos ingenios? ¿Es la clave del misterio del radiómetro, ese molinillo encerrado en una ampolla de vidrio que se pone a girar cuando se ilumina?

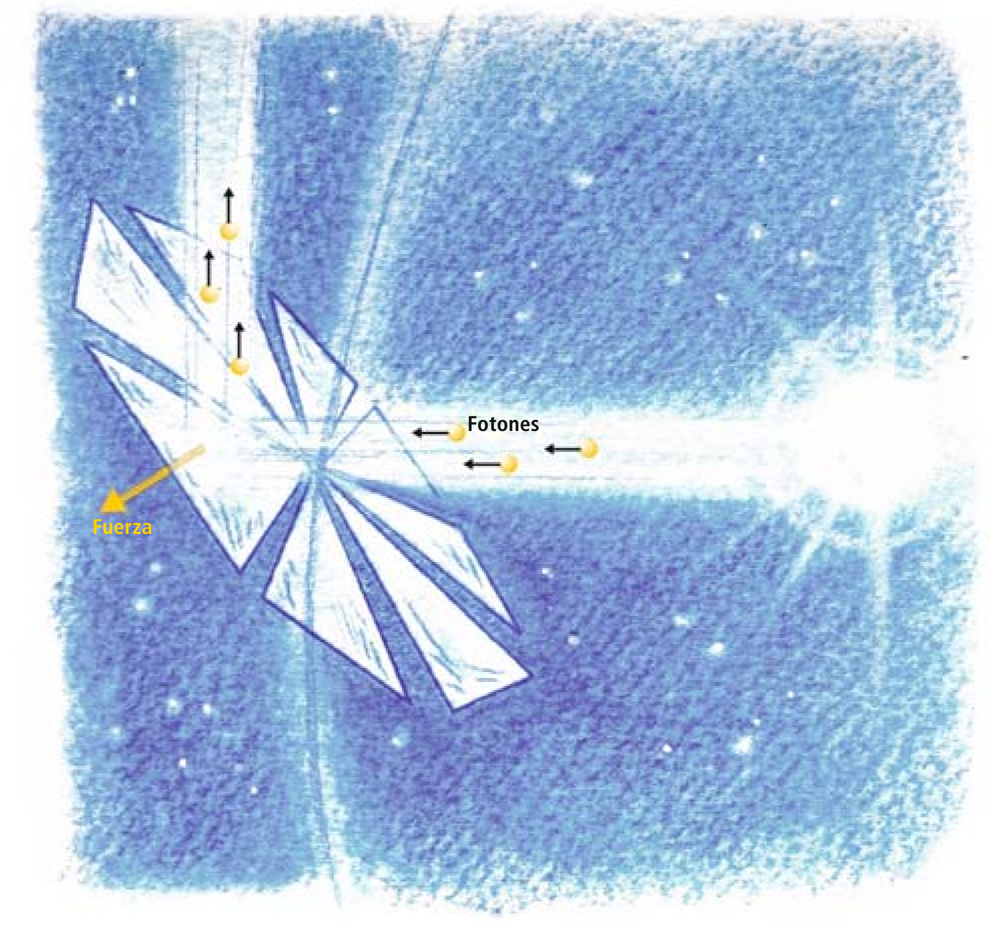
Para limpiar de guijarros una superficie, los albañiles dirigen hacia éstos un potente chorro de agua. Cada molécula de agua que choca con un guijarro le cede cantidad de movimiento; todos esos pequeños impulsos se suman para crear una fuerza casi continua que empuja la grava. Si sustituimos el chorro de agua por un haz luminoso, el fenómeno es análogo. La luz se compone de gránulos de energía, los fotones: cuando son absorbidos o reflejados por una superficie, le transmiten cantidad de movimiento, de modo que le ejercen una presión, llamada de radiación.

El choque de los fotones

Esa presión lumínica es muy débil. Dado que la cantidad de movimiento de un fotón es igual a su energía dividida por la velocidad de la luz, un flujo de fotones ejerce, sobre una superficie absorbente (ennegrecida), una fuerza igual a la potencia absorbida dividida por la velocidad de la luz. Un haz lumínico de un watt ejerce, por tanto, una fuerza de tres mil millonésimas de newton; es decir, para una superficie de un milímetro cuadrado, una presión de milésimas de pascal.

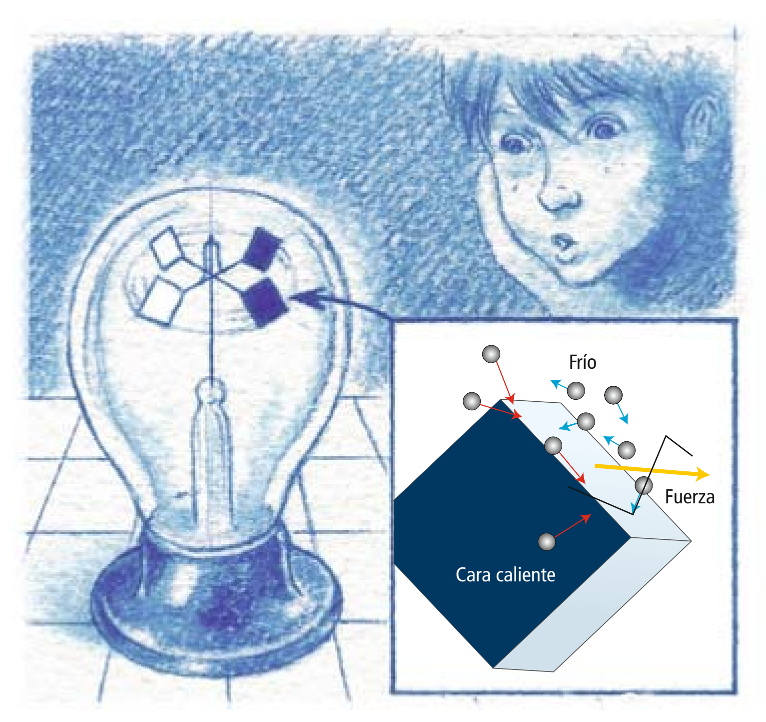
Aunque ínfima, la presión de radiación se hace notar cuando empuja objetos de poca masa o cuando actúa durante un tiempo prolongado. Los físicos experimentales moderan de ese modo los chorros de átomos cuando crean nubes atómicas ultrafrías. Un átomo de cesio tiene una masa aproximada de 3×10^{-25} kilogramos; golpeado cada segundo por 20 millones de fotones de 850 nanómetros de longitud de onda que inciden sobre él, el átomo sufre una aceleración igual a 5000 veces la de la gravedad: si se moviera a 300 metros por segundo, el átomo se inmovilizaría en seis milisegundos, tras recorrer un metro.

La acción prolongada de la presión de radiación puede manifestarse en el espacio, donde no hay rozamiento que se oponga al movimiento. En ello se basan las velas solares (*figura 1*). En el suelo terrestre, la potencia solar recibida por una superficie perpendicular al flujo lumínico es de 1,4 kilowatt por metro cuadrado, lo que corresponde a una fuerza de 4 millonésimas de newton. Con un material reflectante, esa fuerza se duplica: los fotones, reflejados por el espejo, se proyectan con una velocidad igual y opuesta a la inicial, transfiriendo así dos veces a la vela su cantidad de movimiento.

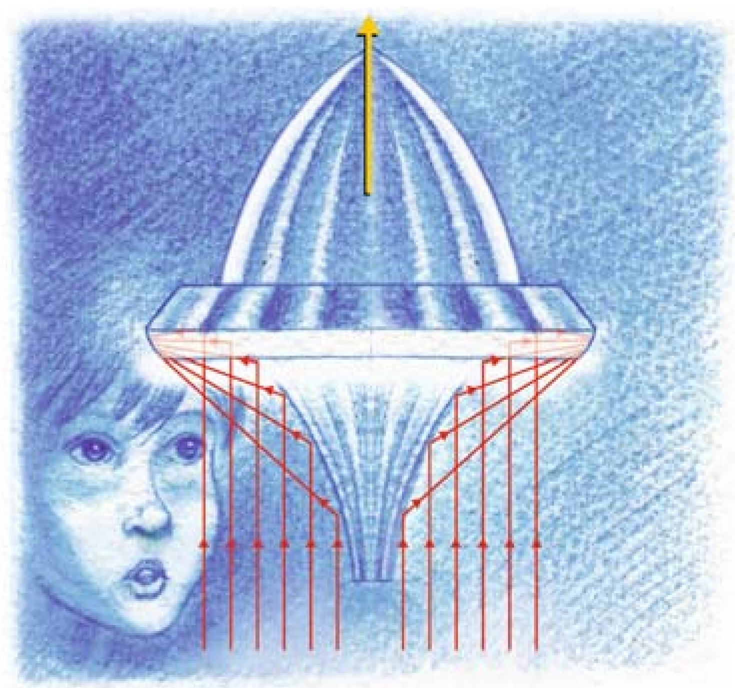


1. Cada fotón transporta una cantidad de movimiento igual a su energía dividida por la velocidad de la luz. Esta puede, por tanto, transmitir un impulso a la materia. Las "velas" reflectantes del satélite experimental *Cosmos 1* emplearon de ese modo los fotones emitidos por el Sol para hacer variar la órbita del satélite, acelerándolo sobre su trayectoria.

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE BRUNO VACARO



2. Las aletas del radiómetro giran merced a la acción de la luz. En un vacío perfecto, la cara reflectante de cada aleta sufriría un empuje doble que el de la cara negra. En la práctica, el vacío es parcial y las aletas giran en sentido contrario al esperado: las moléculas de aire, más veloces en la proximidad de la cara negra (donde el aire está más caliente), inciden de sesgado sobre el borde de la aleta con mayor violencia que las moléculas cercanas a la cara reflectante. Así aparece una fuerza resultante (*amarillo*).



3. El artefacto volador experimentado por Lightcraft Technologies está propulsado por un haz láser, de diez kilowatt de potencia, que le llega por abajo. Gracias a la peculiar forma del objeto, los rayos luminosos se enfocan en la cara interna de la corona, donde calientan el aire ambiente hasta más de 10.000 ºC. La potente dilatación del aire así ionizado (*representado en la ilustración por un resplandor blanco*) crea sobre el ingenio un empuje hacia arriba.

El satélite *Cosmos 1*, de 100 kilogramos de masa, hubiera desplegado una superficie alar de 600 metros cuadrados, unas velas fabricadas en mylar, material muy ligero. En ausencia de gravedad, su aceleración hubiera sido de unas 50 micras por segundo al cuadrado: al cabo de un día, la velocidad comunicada por la luz hubiera alcanzado los cuatro metros por segundo, es decir, 14 kilómetros por hora.

¿Explica la presión de radiación el funcionamiento del radiómetro, una ampolla enrarecida que encierra cuatro aletas de mica montadas en un eje? Cada aleta posee una cara reflectante natural y una cara ennegrecida absorbente. Como hemos visto, la fuerza ejercida por los fotones sobre la cara brillante dobla la que actúa en la cara oscura. Cabe esperar, pues, que el radiómetro gire en el sentido del empuje sobre las caras reflectantes.

El radiómetro se burla de sí mismo

Pues ocurre precisamente lo contrario: la cara oscura empuja más. ¿Por qué? Habíamos olvidado que la energía transportada por la luz puede transformarse en calor. En el radiómetro, absorbe energía lumínica sólo la cara ennegrecida, que se calienta poco a poco. Al estar esa cara más caliente que el gas ambiente, ¿cederá energía a las moléculas de aire que incidan en ella, comunicándoles un incremento de velocidad y sufriendo en consecuencia una fuerza de reacción mayor que la que opera sobre la cara brillante?

Esa explicación resulta válida para presiones muy reducidas. Pero en los radiómetros corrientes, los múltiples choques entre moléculas tienen por efecto igualar las presiones a uno y otro lado de cada aleta. Tal como lo vio James Clerk Maxwell en 1879, recuperando una idea de Osborne Reynolds, la clave del enigma —sutil y complejo en sus detalles— se halla en los bordes de las aletas y no en sus caras: hasta distancias del orden del espesor de cada aleta, las moléculas no colisionan entre sí. Al ser más rápidas, las moléculas de aire del lado caliente inciden oblicuamente en los bordes de las aletas con mayor violencia que las moléculas del lado frío; la fuerza resultante se dirige, pues, de la cara oscura a la brillante (*figura 2*).

Esa excursión por el radiómetro nos muestra que la absorción de la luz permite aumentar la temperatura y forzar la circulación del aire. En esa idea se basa el proyecto experimental de *Lightcraft Technologies*. Una fuente lumínica calienta a distancia el gas contenido en la caldera del ingenio, gas cuya eyección propulsa al aparato. Una maqueta de 50 gramos, sometida a un haz láser de 10 kilowatt, se elevó así a una altura de 71 metros en el desierto de Nuevo México. La luz láser, enfocada sobre una corona merced a la forma paraboloide de la cara inferior del artefacto (*figura 3*), llevó al aire ambiente hasta más de 10.000 ºC, es decir, una temperatura mucho mayor que la de la superficie del Sol. A esa temperatura, las moléculas del aire se hallan totalmente ionizadas; el dispositivo es propulsado por la tremenda dilatación del plasma así formado. Mas, para poner en órbita una masa de un kilogramo, hará falta un láser de al menos un megawatt...

Angeles y demonios

¿Cuántos ángeles pueden bailar en la cabeza de un alfiler?

Gabriel Uzquiano

El mundo podría haber sido muy diferente. Kennedy podría no haber sido asesinado, la guerra de Vietnam podría haber concluido antes, la guerra fría podría haber tomado otros derroteros, etc. No es difícil imaginar posibilidades todavía más remotas: Don Quijote podría haber sido una persona de carne y hueso que arremetiera contra más de un molino de viento. Podría existir una infinidad de ángeles bailando en la cabeza de un alfiler, etc.

Hay excepciones. No parece que podamos imaginar la posibilidad de que exista un número finito de números primos o que siete sea divisible por tres. (Tal vez podríamos imaginar mundos en los cuales usásemos el lenguaje de manera diferente y la palabra 'siete' se utilizara para referirse al número nueve, pero no mundos en los cuales el número siete, como quiera que lo llamásemos, fuese divisible por tres.) De ahí que la gran mayoría de las proposiciones matemáticas sean tradicionalmente consideradas como necesarias.

Pero, ¿qué hace que una proposición *p* —por ejemplo, la proposición de que tres ángeles bailen en la cabeza de un alfiler— sea posible mientras que otra proposición *q*, como por ejemplo que siete sea divisible por tres, sea imposible?

Mundos posibles

Una teoría al respecto es el realismo modal de David Lewis. Una proposición *p* es posible, si y solamente si hay un mundo posible en el cual la proposición *p* es cierta. Decir que es posible que Kennedy no hubiera sido asesinado es decir que hay un mundo posible en el cual Kennedy no es asesinado. No hay duda de que se trata de un mundo muy diferente del nuestro; Kennedy concluye su mandato y la guerra fría tal vez sigue un curso diferente. Pero, por otro lado, según David Lewis, se trata de un mundo tan concreto como el nuestro (eso sí, un mundo tanto causal como espacio-temporalmente aislado de este mundo en el que Kennedy fue asesinado). De aquí se sigue una increíble visión de una infinidad de mundos posibles, donde podemos encontrar cada posible combinación de acontecimientos. Hay mundos en los cuales Don Quijote es una persona de carne y hueso que embiste molinos de viento y se comporta tal como Cervantes describía en su novela, y mundos en los cuales una infinidad de ángeles bailan en la cabeza de un alfiler. Más aún, hay mundos cuyos estados de existencia son tales, que no hay palabras suficientes para hacerles justicia.

¿Cuántos puntos hay en la cabeza de un alfiler?

¿Cuántos ángeles podrían bailar en la cabeza de un alfiler? Si se trata de seres inmateriales sin extensión, entonces nuestra respuesta parecería depender del número de puntos sobre la superficie de la cabeza de un alfiler. Si asumimos la representación tradicional de la estructura del espacio por medio de conjuntos de tríos ordenados de números reales, entonces la cabeza de un alfiler incluiría tantos puntos como números reales. Se sigue que podría haber tantos ángeles bailando en la cabeza de un alfiler como números reales, pero —a menos que permitiéramos la existencia de más de un ángel en el mismo punto— no más.

¿Cuántos números reales hay? Como se trata de un conjunto infinito, necesitamos recurrir a la escala de números álef que Georg Cantor introdujera a finales del siglo XIX para hacer distinciones de cardinalidad entre conjuntos infinitos. $\aleph_0$ —álef subcero— sería el primer número cardinal transfinito, y correspondería a la cardinalidad del conjunto de los números naturales. Tras álef subcero viene álef subuno, $\aleph_1$, que es la cardinalidad del menor conjunto de mayor cardinalidad que el conjunto de los números naturales. ¿Qué quiere decir que un conjunto tenga menor, igual o mayor cardinalidad que otro?

A tiene la misma cardinalidad que *B* si y solamente si existe una correspondencia biunívoca entre ambos. Es decir, si es posible emparejar miembros de *A* con miembros de *B* de manera que todo miembro de *A* esté emparejado con un solo miembro de *B* y cada miembro de *B* esté emparejado con un solo miembro de *A*.

Por otro lado, *A* tiene menor cardinalidad que *B* si es posible establecer una correspondencia biunívoca entre *A* y un subconjunto de *B*, pero no entre *B* y un subconjunto de *A*.

Finalmente, *A* tiene mayor cardinalidad que *B* si no es posible establecer una correspondencia biunívoca entre *A* y un subconjunto de *B*, pero sí entre *B* y un subconjunto de *A*.

No sabemos mucho acerca de $\aleph_1$. Sabemos que la cardinalidad del conjunto de números reales es $2^{\aleph_0}$, que, a su vez, es estrictamente mayor que $\aleph_0$. Se sigue de la definición de $\aleph_1$ que $\aleph_1 \leq 2^{\aleph_0}$; lo que desconocemos es si $2^{\aleph_0}$ es, o no, estrictamente mayor que $\aleph_1$. A la proposición de que $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$ se la conoce como *hipótesis del continuo*.

Aunque debemos a Kurt Gödel la observación de que la hipótesis del continuo es consistente con los axiomas de la teoría de conjuntos, es a Paul Cohen a quien debemos la observación de que la hipótesis del continuo es independiente de los axiomas de la teoría de conjuntos; es consistente con los axiomas que $2^{\aleph_0}$ sea, por ejemplo, $\aleph_2$ o incluso mucho mayor.

Angeles y cohabitación

Como no sabemos si la hipótesis de continuo es verdadera, no podemos concluir que podría haber a lo sumo $\aleph_1$ ángeles bailando en la cabeza de un alfiler. Pero hay otra razón para pensar que podrían existir todavía más ángeles sobre la cabeza de un alfiler. ¿Por qué excluir, en particular, la posibilidad de que haya más de un ángel ocupando el mismo punto? Si permitimos la cohabitación de más de un ángel en un solo punto, entonces el hecho de que haya tan sólo $2^{\aleph_0}$ puntos en la cabeza de un alfiler no nos proporciona mucha información, ya que un solo punto bastaría entonces para acumular todos los ángeles que quisiéramos.

La hipótesis de que un solo punto sea ocupado por más de un ángel puede parecer inverosímil. Mas, curiosamente, nuestros ángeles se comportarían tal como lo hacen ciertas partículas elementales —los bosones, por ejemplo— que, según la física de partículas moderna, pueden ocupar un mismo punto al mismo tiempo.

Ahora que $2^{\aleph_0}$ ya no constituye una cota superior, podemos identificar dos hipótesis sobre el número de ángeles que podrían bailar en la cabeza de un alfiler:

(1) *Hipótesis de extensibilidad indefinida*: existe para cada álef un mundo posible en el cual existen exactamente álef ángeles, pero no hay un mundo posible en el cual existen ángeles en tal abundancia que ningún álef supera su cardinalidad.

(2) *Hipótesis de plenitud*: existe un mundo posible en el cual existen ángeles en tal abundancia, que ningún álef supera su cardinalidad.

¿Qué hipótesis es más razonable? ¿Hay razones para preferir una a la otra?

Plenitud

La Hipótesis de Plenitud es incompatible con dos tesis razonables. La primera es la siguiente:

(A) *Toda colección de objetos que no sean conjuntos forma un conjunto*.

Sería ingenuo pensar que cualesquiera objetos forman un conjunto. (La razón es más conocida como la paradoja de Russell. Si toda colección de objetos forma un conjunto, entonces algunos conjuntos —como el conjunto de todos los conjuntos— se pertenecen a sí mismos, mientras que otros —como el conjunto de páginas de *Investigación y Ciencia*— no se pertenecen a sí mismos. Consideremos el conjunto *r* de todos los conjuntos que no se pertenecen a sí mismos. ¿Se pertenece *r* a sí mismo? Si lo hace, entonces *r* debe cumplir la única condición necesaria para pertenecer a *r*: no pertenecerse a sí mismo. Si no lo hace, entonces *r* cumple una condición suficiente para pertenecer a *r* y por tanto debe pertenecerse a sí mismo. Se sigue que *r* se pertenece a sí mismo si y solamente si no lo hace, lo cual nos lleva a una contradicción.)

La paradoja de Russell no supone amenaza alguna para colecciones cuyos miembros no son conjuntos. Nuestra primera tesis dice que podemos asumir que cualquier colección tal da lugar a un conjunto. Existe, por tanto, un conjunto de puntos espacio-temporales, existe un conjunto de colaboradores de *Investigación y Ciencia* y un conjunto de mesas y sillas.

La segunda tesis viene dada por la siguiente observación:

(B) *Todo conjunto posee más subconjuntos que elementos*.

O, dicho de otro modo, no hay una correspondencia biunívoca entre los elementos de un conjunto y sus subconjuntos.

Justificación. Supongamos, por ejemplo, que existe una correspondencia biunívoca entre los elementos de un conjunto *a* de ángeles y sus subconjuntos. Llamemos a un ángel *caído* si y solamente si el subconjunto de *a* que le corresponde no lo contiene como miembro. Por ejemplo, si Ariel es el ángel que la correspondencia empareja con el conjunto vacío, uno de los subconjuntos del conjunto inicial, entonces Ariel cuenta como un ángel caído de acuerdo con la correspondencia. Pues bien, dada una correspondencia biunívoca entre los elementos de un conjunto *a* de ángeles y sus subconjuntos, podemos considerar ahora el subconjunto de *a* formado por todos y solamente aquellos ángeles que cuenten como *caídos* de acuerdo con la correspondencia. Llamemos *Lucifer* al ángel asociado al subconjunto de ángeles caídos de *a* por medio de la correspondencia. ¿Es el mismo Lucifer un ángel caído? Si lo es, entonces la correspondencia lo asocia a un conjunto al cual él mismo pertenece, de donde se sigue que no lo es. Si no lo es, entonces Lucifer no pertenece al subconjunto que le corresponde y, por tanto, satisface la única condición necesaria para contar como un ángel caído. Por tanto, Lucifer es un ángel caído si y sólo si no es un ángel caído, lo que da lugar a una contradicción. Concluimos, pues, que no hay ninguna correspondencia biunívoca entre los elementos de *a* y sus subconjuntos.

Veamos ahora la justificación de que la hipótesis de plenitud es incompatible con las dos tesis anteriores:

Si, tal como dice la hipótesis de plenitud, existe un mundo posible en el cual existen ángeles en tal abundancia que ningún álef supera su cardinalidad, entonces, dado (A), la colección de los mismos debe formar un conjunto. Pero todo conjunto admite un álef como su cardinal. Sin embargo, dado (B), el conjunto de sus subconjuntos posee una cardinalidad mayor que el conjunto inicial. Como el conjunto de subconjuntos del conjunto de ángeles debe tener un álef como cardinal, este es mayor que el cardinal del conjunto de ángeles, lo cual contradice la hipótesis de plenitud.

Extensibilidad indefinida

El problema es que la hipótesis de extensibilidad indefinida implica una versión de la hipótesis de plenitud para mundos posibles. Para cada álef, existe un mundo posible en el cual podemos encontrar exactamente álef ángeles. Existen, pues, tantos mundos posibles como hay álefs en la escala de Cantor. Pero esta hipótesis es inconsistente con la observación de que (como ningún mundo posible es un conjunto) la colección de mundos posibles forma un conjunto, por un lado, y el hecho de que existen más subconjuntos del conjunto de todos los mundos posibles que mundos posibles en ese conjunto.

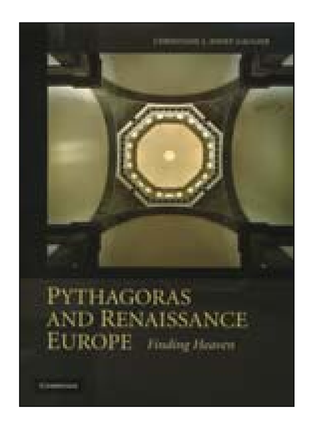
¿Cuántos ángeles pueden bailar en la cabeza de un alfiler? Si abandonamos ambas hipótesis —plenitud y extensibilidad indefinida— parece que nos vemos obligados a admitir que existe un cardinal álef —aunque no sabemos cuál— tal que podrían existir exactamente álef ángeles en la cabeza de un alfiler pero no más. Si la conclusión parece inaceptable, seguramente lo es. Una opción sería abandonar el supuesto de que existe un conjunto de mundos posibles o, de manera similar, un conjunto de todos los ángeles que existen en cada mundo. Otra opción, sin embargo, sería abandonar la extraordinaria visión de mundos posibles que David Lewis propugnaba.

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

¿Quiere saber más?

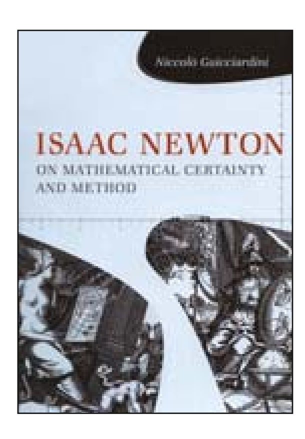
David Lewis presenta su teoría de mundos posibles en *On the Plurality of Worlds*. Blackwell, 1986.

Hugh Woodin expone tanto el problema del continuo como varias líneas de investigación reciente en "The Continuum Hypothesis I" en *Notices of the AMS*, vol. 48, págs. 567-576, 2001.



PYTHAGORAS AND RENAISSANCE EUROPE,

por Christiane L. Joost-Gaugier. Cambridge University Press; Cambridge, 2009.



ISAAC NEWTON. ON MATHEMATICAL CERTAINTY AND METHOD,

por Niccolò Guicciardini. The MIT Press; Cambridge, Mass., 2009.

Matemática y ciencia moderna

La recepción del pitagorismo como factor desencadenante de la matematización del saber

Suele darse por sentado que la matemática constituye el sello distintivo de la revolución científica. Pero apenas se profundiza en la influencia determinante que en ello ejerció la recepción del pitagorismo en Occidente (*Pythagoras and Renaissance Europe*). Su reputación le viene de Filolao, a quien debemos la descripción de los poliedros (hexaedro, tetraedro, octaedro, dodecaedro e icosaedro). Porque Platón se ocupó de ellos en el *Timeo* han venido a denominarse "sólidos platónicos". La figura favorita de Pitágoras de la geometría plana era el círculo; sin principio ni fin, representaba la continuidad eterna de lo divino. Su figura geométrica preferida en tres dimensiones era la esfera; desplegaba igualdad en todos los puntos de su superficie y podía incluir cualquiera de los cinco sólidos.

El cubo desempeñó un papel importante. Podía describirse de dos maneras: en cuanto sólido geométrico regular, dotado de seis caras, y numéricamente, en razón de sus dimensiones iguales, como la tercera potencia (o cubo) de cualquier número. Otro sólido geométrico admirado por Pitágoras y sus seguidores (en particular, Anatolio, Nicómaco de Gerasa y Filón de Alejandría) era el tetraedro. Dotado de cuatro lados en su base, simbolizaba la perfección del número 4, guarismo que compendiaba la importancia de los cuatro elementos. La significación de ese número se memorizaba en un triángulo equilátero, puntuado por los cuatro primeros números, cuya disposición o suma de los enteros componentes daba 10. La figura se hizo famosa con el nombre de *tetraktys*. Aëcio, en el siglo primero d.C., describía la *tetraktys* de Pitágoras como la fuente de toda naturaleza porque se fundaba en la "cuaternidad" de los elementos. Un siglo más tarde, Theón de Esmirna la denominaba sacra *tetraktys* porque representaba el cosmos, ahora simbolizado por el número 10.

En la antigüedad, cada número tenía personalidad, sexo, simpatía y significados especiales, que se potenciaban al elevarse al cuadrado o al cubo. Número figurado era el que podía representarse como una figura geométrica creada mediante puntos igualmente espaciados (por ejemplo, los números 3, 6 o 10 generaban un triángulo). Número perfecto era aquel que equivalía a la suma de sus divisores (6 = 1 + 2 + 3; 28 = 1 + 2 + + 4 + 7 + 14). El número podía sacar a la luz el orden escondido en el universo. Las siete cuerdas de la lira reflejaban el número de los cuerpos celestes (los cinco planetas conocidos en su tiempo más el Sol y la Luna).

Durante el período romano se difundió el teorema de Pitágoras (el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo recto es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados o catetos). En la Edad Media se mantuvo la llama pitagórica desde el impulso inicial de Macrobio, Boecio e Isidoro de Sevilla, quienes se afanaron por explicar la armonía cosmológica. Se atribuyó a Pitágoras la paternidad del cuadrivio, las cuatro disciplinas (aritmética, geometría, música y astronomía) que formaron las artes liberales (con la inclusión posterior del trivio —gramática, retórica y dialéctica).

Los humanistas y renacentistas reemplazaron el escolasticismo aristotélico por el platonismo, convencidos de que detrás de Platón se hallaba Pitágoras. Al propio tiempo, la tradición alquimista, originada en la Antigüedad y desarrollada en el Medievo, se conectaba con la doctrina de la transmutación de los metales en oro y con el mundo subterráneo que se decía había estado habitado por Pitágoras. La arquitectura gótica acusó la influencia de Pitágoras en su desarrollo del simbolismo místico numérico de las catedrales.

El arte y la ciencia no constituían disciplinas separadas en el Renacimiento, ni lo eran la filosofía, la religión, la matemática, la alquimia, la astronomía o la astrología, la cosmología y la arquitectura, o la teoría musical, que procuraba el placer apoyándose en la armonía cosmológica. A comienzos del siglo xv, el sueño de Petrarca de abarcar el legado entero de la antigüedad clásica, griega y latina, parecía posible. La presencia de eruditos griegos se hizo especialmente sensible con la convocatoria del Concilio de Ferrara-Florencia (1438-1439), que supuso la llegada de un aluvión de textos manuscritos. Los centros humanistas de Florencia, Milán, Nápoles, Verona, Bolonia, Ferrara, Roma y Mantua volcaron su atención sobre el legado de Pitágoras. Se "redescubrieron" Filón de Alejandría, Domninos de Larissa o Hermes Trismegisto, misterioso autor de textos sobre magia y ciencias ocultas, llamados herméticos en su honor.

En *De laboribus Herculis* (1390), Coluccio Salutati, canciller de Florencia, explora la relación de los trabajos de Hércules con la búsqueda de la verdad divina. Salutati expresa su profunda admiración por Pitágoras y su tesis de la armonía celeste, que nació con las revoluciones de las esferas celestes. Al abordar la interrelación entre tonos musicales, intervalos y números, recuerda

que la comprensión de la armonía celeste simbolizada por el canto de las músicas fue más tarde explicado por Platón. La tradición humanista iniciada por Salutati fue compartida por su sucesor en la chancillería de Florencia, Leonardo Bruni. Y con ello la admiración hacia Pitágoras. Lo mismo sucedió con Poggio Bracciolini y otros muchos (Pier Vergerio de Padua, Lorenzo Valla, etcétera).

En la segunda mitad del siglo xv el interés en la figura y obra de Pitágoras crece y se convierte en una fascinación casi idolátrica, tras la visita a Florencia de Pletho. Filósofo educado en la ciudad otomana de Adrianópolis, Pletho, cuyo nombre real era Georgius Gemistus, había venido a Florencia integrado en la delegación griega al Concilio de Florencia. En su obra más reputada, *Tratado sobre la ley*, reconoce a Pitágoras como su héroe, por delante de Platón. Con él estuvieron relacionados Juan Bessarion, Nicolás de Cusa y Leon Battista Alberti.

Al defender a Platón frente a sus detractores, Bessarion, uno de los humanistas más capacitados del siglo xv, continuó la obra de su maestro Pletho. La primera sección de su obra principal (*In calumniatorem Platonis*) introduce a Platón a través de su maestro e inspirador Pitágoras. Este nos permite entender a aquél. No menos fervoroso seguidor se mostró Nicolás de Cusa, filósofo y matemático quien se escudaba en la autoridad de Pitágoras para subrayar la importancia fundamental del número para todas las cosas, así terrestres como celestes. El dominio de Pitágoras de los números estuvo también en la mente del arquitecto florentino Leon Battista Alberti. En *De re aedificatoria*, tratado sobre el arte de la construcción inspirado en el *De architectura* de Vitrubio, alude a la supuesta aversión de Pitágoras a las estatuas y efigies en los templos para reforzar su propia tesis sobre la "pureza" arquitectónica. La dimensión y la línea, juntas, definen la proporción, un equivalente de la armonía en música.

Pitágoras continuó inspirando a los intelectuales de finales del siglo xv. Marsilio Ficino concede, en su *Teología platónica*, la paternidad de la inmortalidad del alma a Pitágoras. Define el movimiento del alma como un círculo, sin comienzo ni fin, que se replica infinitamente y se convierte en esfera. Pico della Mirandola, al exaltar a Pitágoras como modelo a seguir, distinguía entre aritmética mercantil y aritmética divina; de esta segunda se ocupó Pico. Declara éste que el 1 (la mónada) es la unidad y que todos los demás números se generan a partir de sus sucesores. Divaga sobre los diversos tipos de números, siguiendo a Espeusipo, Nicómaco, Theón de Esmirna y otros pitagóricos; reconoce los tres tipos de proporción —aritmética, geométrica y armónica— que hallan su reflejo en los símbolos del juicio, la justicia y la paz. La ciencia de la perspectiva, expone, se basa en una triple función de los rayos —directos, reflejos y refractivos—, que remiten a la triplicidad de la naturaleza: intelectual, animal y humana. Conecta la matemática con la música y el alma.

De la misma generación de Pico, Angelo Poliziano, sorprendido por la energía con que Pitágoras defendía la inmortalidad del alma, anotó que explicaba la preferencia por el número 10 y el cubo porque le sugerían el universo. Constantino Lascaris, que vino de Bizancio a Italia, publicó la primera biografía renacentista de Pitágoras, con un notable acopio de información. Pasa a los manuales la idea de un Pitágoras fundador de la aritmética. Johannes Ockenghem compuso un canon para 36 voces, un cuadrado numérico perfecto. En *La armonía musical de los instrumentos*, Franchino Gaffurio declara que Pitágoras fue el primero que acometió una investigación sistemática sobre la tonalidad y la armonía. El estudio de los intervalos musicales por parte de Pitágoras le llevó a descubrir la melodía como producto de una mezcla armoniosa.

La luz de Pitágoras brilló con mayor intensidad durante el siglo xvi. En 1494, Luca Pacioli publicó *La autoridad de la aritmética*, uno de los primeros tratados generales de la matemática impresos, que recoge la doctrina pitagórica; más explícito se muestra en su homenaje a Pitágoras en *Sobre la divina proporción.* Al estudio de la construcción del triángulo rectángulo se consagró Leonardo da Vinci. Por su parte, Celio Calcagnini ponderaba las cualidades magisteriales de Pitágoras, el primer matemático que descubrió que la armonía era un cómputo. Reconoce un movimiento diario de rotación de la Tierra, sin dejar el centro del universo. Copérnico tuvo relaciones directas con Calcagnini y otros astrónomos pitagóricos. De las aportaciones de Pitágoras al campo de la geometría habló Girolamo Cardano. Por su formación en teología

[12]

AXIOMATA
SIVE
LEGES MOTUS

Lex. I.

Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.

Projectilia perseverant in motibus suis nisi quatenus a resistentia aeris retardantur & vi gravitatis impelluntur deorsum. Trochus, cujus partes cohaerendo perpetuo retrahunt sese a motibus rectilineis, non cessat rotari nisi quatenus ab aere retardatur. Majora autem Planetarum & Cometarum corpora motus suos & progressivos & circulares in spatiis minus resistentibus factos conservant diutius.

Lex. II.

Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

Si vis aliqua motum quemvis generet, dupla duplum, tripla triplum generabit, sive simul & semel, sive gradatim & successive impressa fuerit. Et hic motus quoniam in eandem semper plagam cum vi generatrice determinatur, si corpus antea movebatur, motui ejus vel conspiranti additur, vel contrario subducitur, vel obliquo oblique adjicitur, & cum eo secundum utriusq; determinationem componitur.

Lex. III.

La primera página de la exposición de los axiomas o leyes del movimiento en los *Principia*.

y matemática, Kepler se sintió en plena sintonía con la cosmología y geometría pitagóricas. En *Mysterium cosmographicum* sugiere la compatibilidad de Pitágoras con Copérnico. Algo posteriormente, en *Harmonices mundi* se propuso construir una prueba racional, basada en la geometría, de la armonía del mundo.

En la biografía de Pitágoras escrita por Bernardino Baldi en 1588, el más erudito de los matemáticos italianos nos presenta a Pitágoras como el "príncipe de la filosofía italiana". En el momento de explicar por qué Pitágoras marchó a Egipto, dice que allí aprendió geometría y, más tarde, en Babilonia, aritmética y música. "Pitágoras, proclama, fue inferior a Dios, pero superior a todos los demás hombres." La cuestión de la armonía recorre el trabajo de Giorgio Valla y de Francesco Zorzi. Autor de una reputada *Sobre la armonía del mundo*, Zorzi reseña que el número 3 es el símbolo definitivo de la armonía porque refleja el misterio trinitario y se ejemplifica en la perfección del triángulo, que es el comienzo, medio y fin de todo. Copérnico resalta en la dedicatoria del *Sobre las revoluciones de las esferas celestes* el proyecto bien ordenado en que basa la organización del cosmos; son recurrentes, en el cuerpo de la obra, las reflexiones sobre la "armonía" del universo. Con justicia, Galileo consideró a Copérnico un pitagórico.

Con Filippo Brunelleschi, el primer gran arquitecto del Renacimiento, se introduce la idea de que un sistema visual que confirmara que la proporción resultaba de la colaboración de número y for-

LE SCIENZE

ma podría reflejar el orden divino. Y, en efecto, los números cobraron centralidad en la construcción de la iglesia florentina de san Lorenzo por Brunelleschi. Los seis cuadrángulos de la nave intersecan con los tres del transepto. (De acuerdo con la aritmética pitagórica, el seis, el primer número matemáticamente perfecto, incorpora dos veces la perfección de la tríada y simboliza la perfección del universo, mientras que el tres es la perfección primaria porque posee el principio, el medio y el fin.) Los cuadrángulos se complementan con seis arcos soportados por 16 columnas (16 es el cuadrado de 4, o la tétrada, el número básico de la *tetraktys* pitagórica; creían los pitagóricos que reflejaba la división del firmamento entero en 16 regiones); en perfecta simetría, constituían ocho ventanales (un cubo numérico [2 × 2 × 2 = 8] que significa equilibrio, igualdad y sintonía armoniosa). Quizá la obra más intensamente pitagórica de todas las obras de arte renacentistas sea la Stanza della Segnatura, pintada por Rafael para convertirla en biblioteca privada de Julio II. Con su ingenio, Rafael mudó la forma irregular de la cámara en un cubo cuyas seis superficies —techo, cuatro paredes y suelo— confiesan una perfecta unidad geométrica.

La consideración de la matemática en sí misma no llegaría hasta Newton (*Isaac Newton. On Mathematical Certainty and Method*). ¿Qué entendía Newton por matemática? Indiscutido es su afán por dotar de certeza a la filosofía natural con un aparato matemático nunca visto. Desde el propio título de su obra magna, los *Principios matemáticos de filosofía natural* (1687), en clara oposición a los *Principios de filosofía* (1644), de Descartes. Desde la publicación en ocho volúmenes de los *Mathematical Papers* (1967-1981), compilados por D. T. Whiteside, el lector interesado puede acceder a las múltiples contribuciones de Newton a la matemática.

Newton participó en el debate sobre la certeza del método matemático y elaboró su propia respuesta. Se situó frente al probabilismo entendido como valor moral por la mayoría de los miembros de la Regia Sociedad (Robert Hooke y Robert Boyle incluidos). Pero se opuso también ante dos gigantes del análisis común y del nuevo análisis, Descartes y Leibniz. Newton halló afinidades con el pensamiento de Isaac Barrow, Christian Huygens y, de manera indirecta, de Thomas Hobbes.

Siendo todavía joven profesor lucasiano, Newton estableció su programa en las *Optical Lectures*, que no era otro que convertir a la matemática en garante de la certeza de la filosofía natural. De Barrow aprendió a ver la geometría como modelo de razonamiento. En su biblioteca tenía anotados la *Geometría* de Descartes, la *Opera mathematica* de Francois Viète, las *Exercitationum mathematicarum* de Frans van Schooten, la *Clavis mathematicae* de William Oughtred y la *Operum mathematicarum* de John Wallis. Newton estudió los *Elementos* de Euclides en la versión algebraica de Barrow; aprendió notación algebraica en la *Clavis mathematicae* de Oughtred y en la *Opera mathematica* de Viète. Newton se formó con la *Geometría* de Descartes, quien enseñaba que los problemas geométricos podían expresarse en términos de ecuaciones algebraicas (resolución o análisis de un problema). Newton aprendió muy pronto a dominar el álgebra aplicada a la geometría.

Comenzó por abordar un problema harto difícil: trazar tangentes a la elipse, la hipérbola y otras curvas. En 1669 llegó a sus manos la *Logarithmotechnia*, de Nicolaus Mercator, quien había empleado una ecuación infinita para calcular el área de la superficie subtendida por la hipérbola. Tras los resultados sobre series infinitas, aplicadas a la cuadratura y publicados en *De Analysi per Aequationes Numero Terminorum Infinitas* (1669), Newton refleja su interés en el análisis algebraico y la síntesis geométrica en *Tractatus de Methodis Serierum et Fluxionum*, compuesto en 1670-1671. Desarrolla el método analítico de las fluxiones, que dividió en dos partes: el método directo (cálculo de tangentes y curvaturas) y método inverso (cálculo de áreas y rectificaciones de curvas). *De methodis* termina con extensas tabulaciones de áreas de superficies subtendidas en curvas. En un *addendum* ulterior, expuso la idea de que se requería una forma *sintética* del método de las fluxiones, sin infinitesimales. El método sintético de fluxiones —el método de la primera y última ratio— informa los *Principia*.

En sus *Lucasian Lectures on Algebra*, que William Whiston editó en 1707 con el título de *Arithmetica Universalis*, Newton generalizaba el análisis común de Descartes y llegaba a nuevos resultados en ese campo. Pero incluso en ese texto, eminentemente cartesiano, encontramos trazas de su fascinación por el método de descubrimiento de los antiguos. Se supone que los antiguos no conocían las herramientas algebraicas y cultivaron un análisis geométrico que él deseaba restablecer. Y dejó claro que la síntesis, o composición, de problemas geométricos debía desarrollarse —*contra* Descartes— en términos independientes de consideraciones algebraicas.

La fascinación por el análisis y síntesis de los antiguos, que en su opinión constituía un óptimo sustituto de los cartesianos análisis común (álgebra) y síntesis (técnicas sobre la construcción de ecuaciones prescritas por Descartes), impulsó a Newton a leer el séptimo libro de la *Collectio* de Pappus (compuesta en el siglo cuarto de nuestra era). Newton se hallaba convencido de que los *Porismos* de Euclides, perdidos y descritos de forma incompleta en la sinopsis de Pappus, constituían el corazón del método analítico de descubrimiento, aunque enteramente geométrico, de los antiguos. Sostenía que el análisis geométrico de los antiguos era superior al análisis algebraico de los modernos en términos de elegancia y sencillez. Su éxito magno, logrado en un tratado titulado *Solutio Problematis Veterum de Loco Solido* sobre la restauración de los "lugares sólidos de los antiguos", constituía la solución por medios puramente geométricos del locus de cuatro líneas de Pappus. La importancia de la geometría proyectiva emergió también en el estudio de las cúbicas, cuando Newton descubrió que esas curvas algebraicas pueden subdividirse en cinco clases proyectivas.

No debiéramos olvidar otro factor que determinó la opción de Newton por la geometría: su encuentro con el *Horologium oscillatorium*, de Huygens. En su obra maestra impresa en 1673, Huygens había empleado la teoría de la proporción y el argumento de límite *ad absurdum* y había desdeñado el uso de ecuaciones e infinitesimales. Huygens ofrecía un ejemplo a Newton de cómo la matematización de la filosofía natural podía presentarse de forma consonante con los ejemplos de la antigüedad. Cuando Newton compuso los *Principia* en los años 1684-1686 disponía ya de un abanico amplio de métodos matemáticos, métodos que pudo desplegar en el estudio de la fuerza y el movimiento.

Luis Alonso

EN EL PROXIMO NUMERO DE MARZO 2010

La verdad del desnudo,

por Nina G. Jablonski

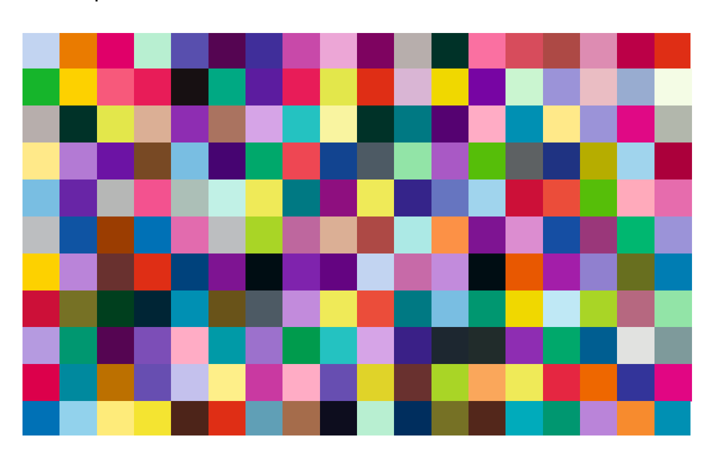
La investigación ha avanzado en el descubrimiento de la razón de la ausencia de pelo en humanos. La piel desnuda habría desempeñado una función clave en la aparición de otros rasgos importantes.



Visión de colores prohibidos,

por Vincent A. Billock y Brian H. Tsou

Aunque prohibida en las teorías de la percepción del color, no es imposible la visión de verde rojizo o de azul amarillento. Estas alucinaciones permiten atisbar en el fenómeno de la oposición visual.



Lluvia de estrellas,

por Erick T. Young

Los astrónomos resuelven cuestiones pendientes sobre la génesis estelar.

Nitrógeno: un problema global,

por Alan R. Townsend y Robert W. Howarth

Dependemos del nitrógeno para abonar los campos, pero su creciente consumo mundial daña el medio y amenaza la salud.

Más autonomía en el motor,

por Ben Knight

Las técnicas emergentes podrían conseguir unos motores de combustión interna de rendimientos sustancialmente mayores, ahora que los vehículos ecológicos ganan terreno.

